Veränderungen der magnetischen Eigenschaften von Basaltsäulen seit dem Tertiär

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch- Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Georg-August-Universität

zu Göttingen

vorgelegt von

GERHARD ZECH

aus Darmstadt

Göttingen 1966

Veränderungen der magnetischen Eigenschaften von Basaltsäulen seit dem Tertiär

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch- Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Georg-August-Universität

zu Göttingen

vorgelegt von

GERHARD ZECH

aus Darmstadt

Göttingen 1966

UNIVERSITEITSBIBLIOTHEEK - LEIDEN -

D 7
Referent: Priv.-Doz. Dr. Siebert
Korreferent: Prof. Dr. Voigt
Tag der mündlichen Prüfung: 25.2. 1966

Inhalt

	Seite
Zusammenfassung	1
1. Einleitung	2
1.1 Problemstellung	2
1.2 Grundbegriffe	2
1.21 Paläomagnetismus	2
1.22 Gesteinsmagnetismus	2
2. Basalt und seine magnetischen Bestandteile	4
2.1 Entstehung von Basaltsäulen	4
2.2 Chemische und kristallographische Eigenschaften der magnetischen Bestandteile	6
2.21 Titanomagnetite	6
2.22 Oxydierte Titanomagnetite	7
2.23 Titanohämatite	8
2.3 Magnetische Eigenschaften der Titanomagnetite	8
2.31 Die spontane Magnetisierung	8
2.32 Korngröße und Blochwand-Abstände	13
2.33 Relaxationszeit für die Ummagnetisierung durch thermische Schwankungen bei Eindomänenkörnern	13
2.34 Wandverschiebungen	15
2.35 Unterscheidung von Thermoremanenz und isothermaler Remanenz	15
2.36 Abhängigkeit der Thermoremanenz von der Korngröße	16
3. Magnetische Untersuchungen	16
3.1 Auswahl von Basaltsäulen	16
3.2 Meßapparaturen	17
3.3 Meßergebnisse	22
3.31 Gesamtübersicht	22
1. Natürliche Remanenz	25
2. Sättigungsmagnetisierung	25
3. Koerzitivkraft	25
4. Curietemperatur	25
3.32 Einzelergebnisse der tertiären Basaltsäulen aus der Göttinger Umgebung	26
1. Grefenburg	26
2. Steinberg/Meensen	30

Seite

3.33 Einzelergebnisse der rezenten Basaltsäulen aus Island 33

1. Holmur 33

2. Djorsar 36

3. Skeljafell rez. 39

4. Rauda 41

5. Godafoss 42

6. Ellidaar 44

7. Dettifoss 46

8. Skeljafell 46

4. Chemische und kristallographische Untersuchungen 51

4.1 Experimentelle Ergebnisse 51

4.11 Erzmikroskopische Beobachtungen 51

4.12 Zusammenstellung magnetischer Meβergebnisse im Hinblick auf chemische Untersuchungen 51

4.13 Chemische Analysen und Debye-Scherrer-Aufnahmen 52

4.2 Vergleich der chemischen Analysen mit den magnetischen Messungen und den kristallographischen Untersuchungen 55

4.21 Inhomogenität der Titanomagnetite am Säulenrande 55

4.22 Vergleich mit AKIMOTOS Diagrammen 55

4.23 Temperatur-Einfluβ auf die Art des Oxydationsprozesses 57

4.24 Mögliche Ursachen für den Temperatureinfluβ 59

5. Zeitlicher Ablauf 63

5.1 Zeitliche Veränderungen der magnetischen Eigenschaften 63

5.2 Mögliche Ursachen für eine Veränderung der natürlichen Remanenz 63

5.21 Einwirkungen des magnetischen Erdfeldes 65

5.22 Veränderungen der Abkühlungsspannungen 66

5.23 Wärmebewegung 67

5.24 Oxydation 72

5.3 Ausblick 73

Literaturverzeichnis 76

Zusammenfassung

Die Verteilung der magnetischen Eigenschaften in Basaltsäulen wurde untersucht. Dazu wurden t e r t i ä r e Basaltsäulen aus der Göttinger Umgebung und r e z e n t e Basaltsäulen aus Island benutzt. Übereinstimmend für alle Säulen wurde eine von außen nach innen fortschreitende Veränderung der magnetischen Eigenschaften festgestellt. Zwischen Rand und Mitte treten bei den tertiären Säulen wesentlich größere Unterschiede auf als bei den rezenten.

Aus Vergleichen von Curietemperatur und Sättigungsmagnetisierung, sowie von Abmagnetisierungskurven der natürlichen und der künstlichen Thermoremanenz, von Debye-Scherrer-Aufnahmen, chemischer Analyse und Koerzitivkraft für Proben jeweils des Säulenrandes und der Säulenmitte ergibt sich folgende Deutung:

Ein O x y d a t i o n s p r o z e s s verändert im Verlaufe geologischer Zeiten die magnetischen Eigenschaften der tertiären Basaltsäulen von außen her. Dabei nimmt die Curietemperatur zu und die Sättigungsmagnetisierung ab; eine größere Inhomogenität in der chemischen Zusammensetzung und in der Kristallstruktur werden herbeigeführt. Dadurch wächst die Koerzitivkraft an. Die bei diesem chemischen Prozeß auftretenden Kräfte verursachen eine Verringerung des Betrages der Remanenz, deren Richtung erhalten bleibt.

Auch andere Prozesse, die eine Verringerung der natürlichen Remanenz herbeiführen könnten, werden diskutiert. Sie können aber nicht die vorliegende Verteilung der natürlichen Remanenz in der Basaltsäule erklären.

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

1. Eine zuverlässige Aussage über das magnetische Erdfeld in früheren geologischen Epochen erfordert eine genaue Kenntnis der Veränderungen in Gesteinen, die für paläomagnetische Untersuchungen verwendet werden. Darüber hinaus besteht ein grundsätzliches Interesse an der zeitlichen Veränderung von Mineraleigenschaften in Gesteinen.

2. Da Veränderungen seit dem Tertiär nicht direkt beobachtet werden können, sind sie durch eine Kombination möglicher Untersuchungen indirekt zu erschließen. Hier soll versucht werden, aus der jetzigen Verteilung der magnetischen Eigenschaften in Basaltsäulen ihre zeitliche Entwicklung und deren Ursachen zu ermitteln.

1.2 Grundbegriffe

1.21 Paläomagnetismus

Paläomagnetische Untersuchungen behandeln das Magnetfeld der Erde in früheren geologischen Epochen. Es scheint sicher, daß in bestimmten Fällen die Magnetisierung von Gesteinen über lange Zeiten eine frühere Richtung des Erdfeldes im wesentlichen konservieren kann. Paläomagnetische Ergebnisse lassen auf eine mehrfache Polumkehr und Kontinentverschiebungen schließen.

1.22 Gesteinsmagnetismus

Der Gesteinsmagnetismus[+)] kann als Hilfswissenschaft des Paläomagnetismus, selbständiges Teilgebiet der Geophysik und als Spezialgebiet der Festkörperphysik

[+)] Die Bezeichnung "Gesteinsmagnetik" ist sprachlich richtiger, doch kaum gebräuchlich.

(Eigenschaften kleiner voneinander unabhängiger ferrimagnetischer Partikel) betrachtet werden.

Wichtigstes Ziel gesteinsmagnetischer Arbeit ist, die Entstehung und Veränderung der Magnetisierung in Gesteinen zu erklären. Träger der Magnetisierung sind im allgemeinen ferrimagnetische Substanzen. Sie sind in Basalt als Körner der Größe 1 bis 100 µ enthalten. Nach der Entstehung unterscheidet man thermoremanente[+], chemisch remanente[+] und viskose Magnetisierung.

Thermoremanente Magnetisierung entsteht beim Abkühlen ferro- oder ferrimagnetischer Substanz in einem magnetischen Feld unter den Curiepunkt. Die bei hoher Temperatur leicht ausrichtbaren Weiss'schen Bezirke "frieren" beim Abkühlen ein.

Chemisch remanente Magnetisierung kann sich bilden bei chemischer Umwandlung eines Stoffes in eine ferro- oder ferrimagnetische Substanz. Im entstehenden Material erfolgt eine Ausrichtung durch das herrschende Magnetfeld.

Viskose Magnetisierung wird bei normaler Temperatur ohne chemische Veränderungen der magnetischen Substanz angenommen; sie ist eine im Erdfeld entstandene isothermale Remanenz.

Die thermoremanente und die chemisch remanente Magnetisierung sind so stabil, daß man ihnen eine Dauer über geologische Epochen zuschreibt. Viskose Magnetisierung wird leicht durch physikalische Einflüsse, wie zum Beispiel Wärmebewegung, entfernt.

Die Resultierende aus thermoremanenter, chemisch remanenter und viskoser Magnetisierung bezeichnet man als natürliche remanente Magnetisierung[+]. In der natürlichen remanenten Magnetisierung ist jedoch durch ein äußeres Feld reversibel induzierte Magnetisierung nicht enthalten.

[+] kürzer: Thermoremanenz (TRM), chemische Remanenz (CRM) und natürliche Remanenz (NRM)

2. Basalt und seine magnetischen Bestandteile

2.1 Entstehung der Basaltsäulen

1. Basalt ist v u l k a n i s c h e n U r s p r u n g s
Die Basaltmasse ist von einer gewissen Tiefe ab in Säulen aufgeteilt. Die Länge der Säulen ist meist einige mal so groß wie die Breitenabmessungen. Der polygonale Querschnitt (etwa fünf- bis sechseckig) der einzelnen Basaltsäulen ist auf die Schrumpfung bei der Abkühlung zurückzuführen. Es müssen so lange Spalte aufreißen, bis sich ein Gleichgewicht eingestellt hat zwischen dem Abbau von Spannungen durch Nachgeben des Gesteins und dem Neuentstehen durch weitere Abkühlung.

2. Das P o l y g o n n e t z der Säulen folgt der Bedingung, daß die Abreißarbeit beim Ausgleich der Abkühlungsspannungen ein Minimum sein soll. Diese Bedingung führt (annähernd) zu einem Netz aus kongruenten Polygonen. Bei allseitigem Zug ergibt sich ein Netz aus Sechsecken; tritt ein starker gerichteter Zug hinzu, so ergeben sich Rechtecke (BRINKMANN, 1957). Es ist leicht einzusehen, daß ein Dreiecksnetz die Minimumsbedingung nicht erfüllt; sonst gibt es kein weiteres Netz aus kongruenten Polygonen.

3. Vorwiegend in älterer Literatur wird auch die Theorie diskutiert, daß die Säulenstruktur durch S t r ö m u n g s w i r b e l der flüssigen Lava vorgebildet sein könnte. Entstehende Kristalle ordnen sich mit ihrer Längsachse in Strömungsrichtung an. Damit ist dann eine Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität verknüpft. Im Gegensatz zu der obigen Theorie fanden BROWN, KHAN und STACEY (1964), daß die Anisotropierichtung in der ganzen Säule dieselbe ist[+]. Daraus folgt eine konstante Strömungsrichtung der Lava, die Strömungswirbel als Vorstruktur für die Säulenbildung ausschließt.

[+] Da die Anisotropie im wesentlichen unabhängig von der Säulenstruktur ist, wird sie in dieser Arbeit nicht untersucht.

4. Die A b k ü h l u n g s d a u e r für einzelne Basaltkuppen wurde von KORITNIG (1955) und FROMM (1958) berechnet. Die Autoren gingen beide von der Voraussetzung eines einheitlichen Steinblocks (ohne Risse oder Spalten) und einem Nachbargestein gleicher Wärmeleitfähigkeit und gleicher spezifischer Wärme aus. Die Abkühlungsdauer bis zur Erreichung des heutigen Curiepunktes von etwa 150°C für die Basaltkuppen der Göttinger Umgebung beträgt danach wenigstens Jahrzehnte, auch am Kontakt zum Nachbargestein. Die Abkühlungsdauer wird bei den verwendeten isländischen Basaltsäulen geringer gewesen sein, da die Vorkommen kleiner sind. Andererseits ist dann wahrscheinlich ein Zutritt von Sauerstoff einfacher. Im Vorgriff auf spätere Abschnitte (s. S. 59) kann in beiden Fällen lediglich geringe Oxydation während des Abkühlungsprozesses erwartet werden.

5. Nach MURAWSKI (1957) sind die hier verwendeten Basalte vom Steinberg/Meensen und von der Grefenburg vor etwa 10 Millionen Jahren ebenso wie die anderen Basaltvorkommen der Göttinger Umgebung entstanden. Die Altersangabe für die isländischen Basalte mit meistens ca. 5000 bis 10 000 Jahren (s. Tabellen 2 und 3) beruht auf mündlichen Mitteilungen isländischer Wissenschaftler und auf den Altersangaben der geologischen Karte Islands von KJARTANSSON (Blatt 3 1960 und Blatt 6 1963); häufig liegen C^{14}-Bestimmungen zugrunde. Im allgemeinen läßt sich an Ort und Stelle entscheiden, ob es sich um postglaziale Lava handelt. Die Datierung der beiden Basaltsäulen von 1783 ist historisch belegt.

2.2 Chemische und kristallographische Eigenschaften der magnetischen Bestandteile

2.21 Titanomagnetite

Die weitaus wichtigsten Träger magnetischer Eigenschaften des Basaltes sind Titanomagnetit-Körner[+]. Sie gehören dem ternären System FeO-Fe_2O_3-TiO_2 an; sie sind Ferrite und besitzen die Kristallstruktur des inversen Spinellgitters, das annähernd bestimmt wird durch eine kubisch flächenzentrierte dichteste Kugel-

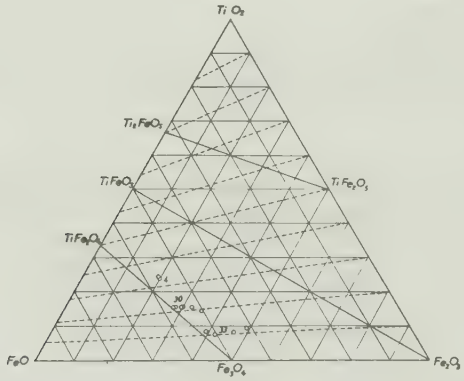


Abb. 1: Ternäres System FeO-Fe_2O_3-TiO_2 mit Oxydationslinien (gestrichelt). Aus drei verschiedenen zermahlenen Basalten wurden bei verschiedenen Temperaturen durch ein magnetisches Verfahren Titanomagnetite mit verschiedener Curietemperatur abgetrennt. Die Titanomagnetite liegen jeweils ungefähr auf einer Oxydationslinie (nach AKIMOTO).

[+] Titanomagnetit wird in der Mineralogie gemeinsam mit dem später erwähnten Titanohämatit als Erz bezeichnet.

packung von Sauerstoffionen. In Wirklichkeit haben die Sauerstoffionen einen geringen Abstand, der von der Kationen-Verteilung abhängt (s. Abb. 2 auf S.11). Das Spinellgitter ist bei Temperaturen von ca. 1200 bis 1300°C für die Mischreihe Fe_2TiO_4-Fe_3O_4 und ein schmales Gebiet in ihrer Nachbarschaft stabil (WEBSTER/ BRIGHT, 1961; TAYLOR, 1961). Die Größe des Stabilitätsgebietes wächst mit steigender Temperatur.

2.22 Oxydierte Titanomagnetite

Der Gleichgewichtszustand hängt auch von den umgebenden Stoffen ab. Unter atmosphärischen Bedingungen werden die Titanomagnetite oxydiert (VERHOOGEN, 1962). Oxydierte Titanomagnetite liegen außerhalb des Stabilitätsgebietes, sind aber metastabil; Zerfall oder Entmischung geht auch nach geologischen Zeitmaßstäben sehr langsam vor sich. Oxydation der Titanomagnetite kann ohne Zerstörung des Kristallgitters bis zur Linie $FeTiO_3$-Fe_2O_3 erfolgen (AKIMOTO, 1962).

Eine vor wenigen Jahren in der Literatur noch diskutierte Mischreihe γ-$FeTiO_3$-Fe_3O_4 mit Kristallisation im inversen Spinellgitter existiert nach WEBSTER/BRIGHT und TAYLOR nicht, da sie sich bei Temperaturen von 1200 und 1300°C nicht synthetisch herstellen läßt. Da die Mischbarkeit im allgemeinen mit steigender Temperatur zunimmt, sollte die Mischreihe dann auch nicht bei Zimmertemperatur existieren. Spinelle entsprechender Zusammensetzung sind demnach oxydierte Titanomagnetite. Titanomagnetite oberhalb der Oxydationslinie von Fe_2TiO_4 sind in der Natur ebenfalls nicht gefunden worden.

2.23 Titanohämatite

Auf der Linie $FeTiO_3$-Fe_2O_3 ist die Mischreihe der Titanohämatite stabil; diese sind rhomboedrisch kristallisiert. Ein Teil der Titanohämatite ist ferrimagnetisch, nämlich y $FeTiO_3 \cdot (1-y)Fe_2O_3$ für $1 > y > 0{,}45$; die übrigen sind antiferromagnetisch (NAGATA/AKIMOTO, 1960, S. 5).

Ein Beispiel: Maghemit, γ-Fe_2O_3, ist im inversen Spinellgitter kristallisiert. Er wird in natürlichen Gesteinen angetroffen, wandelt sich aber leicht in den rhomboedrischen Hämatit, α-Fe_2O_3, um.

Bereits mit dem Erzmikroskop sind rhomboedrische und kubische Phase durch ihr reflexionsoptisches Verhalten zu unterscheiden (SCHNEIDERHÖHN).

2.3 Magnetische Eigenschaften der Titanomagnetite

2.31 Die spontane Magnetisierung und ihre Temperaturabhängigkeit.

1. Im Spinellgitter befinden sich die wesentlich kleineren Kationen+) zwischen den Sauerstoffionen+), tetraeder- oder oktaederförmig von diesen umgeben auf A- oder B-Plätzen. Zwischen ungesättigten Elektronenspins der A- und B-Plätze herrscht eine starke negative Kopplung. Zwischen gleichartigen Gitterplätzen liegt nur eine schwache Wechselwirkung vor. Einer Ausrichtung der Elektronenspins wirkt die Wärmebewegung entgegen.

+) Nach LANDOLT-BÖRNSTEIN (1.Bd.IV.Teil, S. 523 ff., 1955) betragen die Ionenradien jeweils ca. 0,7 bis 0,8 AE bzw. 1,4 AE.

Ebenso wie beim Ferromagnetismus verschwindet die Ausrichtung der Elektronenspins am Curiepunkt. Da die Wechselwirkung komplizierter ist als beim Ferromagnetismus, kann die $I_s(T)$-Kurve[+)] ein Maximum und ein Minimum aufweisen, wie theoretische Untersuchungen (NEEL, 1948) und Experimente (z.B. SCHULT, 1964) zeigen. Nach SCHULT weist die $I_s(T)$-Kurve für Basalte aus der Göttinger Umgebung (auch Steinberg/Meensen und Grefenburg) noch unterhalb der Zimmertemperatur von null verschieden 1. und 2. Ableitungen auf; auch aus der Sättigungsmagnetisierung bei einer Temperatur von ca. -200°C kann noch nicht auf die Sättigungsmagnetisierung am absoluten Nullpunkt geschlossen werden, bei dem erst eine vollständige Ausrichtung der Elektronenspins vorliegt. Allenfalls diese absolute Sättigung ermöglicht einen sicheren Rückschluß auf die Differenz der Elektronenspins aus A- uns B-Gitter.

Hier muß noch eine einschränkende Bemerkung angeschlossen werden: Nach GORTER (1957, s. insbesondere S. 341) sind bei Ferriten auch kompliziertere Konfigurationen der Elektronenspins möglich, wie z.B. die Verteilung der Elektronenspins eines Elementarbezirks auf drei verschiedene Richtungen. GORTER bezeichnet eine derartige Konfiguration als möglich bei titanreichem Titanomagnetit, der i.a. bei den in dieser Arbeit untersuchten Basalten vorliegt. Falls ein Ferrit ganz oder teilweise diese komplizierte Struktur aufweist, ist ein Schluß von der absoluten Sättigung auf die Kationenverteilung im Gitter nicht mehr möglich.

[+)] Sättigungsmagnetisierung in Abhängigkeit von der Temperatur.

2. Zur Beschreibung des Spinells benutzt man eine Elementarzelle mit vier Sauerstoffionen; zwei Kationen befinden sich auf B-Plätzen und ein Kation auf einem A-Platz. Nach GORTER (1957, S. 341) gilt folgende Verteilung auf A- und B-Plätze bei nichtoxydierten Titanomagnetiten:

$$Fe^{3+}(Fe^{2+}_{1+x}\ Fe^{3+}_{1-2x}\ Ti^{4+}_{x})\ O^{2-}_{4} \text{ für } x \leqq 0{,}5$$

$$Fe^{3+}_{2-2x}\ Fe^{2+}_{2x-1}\ (Fe^{2+}_{2x-1}\ Ti^{4+}_{x})\ O^{2-}_{4} \text{ für } 0{,}5 \leqq x \leqq 1$$

Dabei sind Kationen auf B-Plätzen in der Klammer zusammengefaßt. Daraus folgt die absolute Sättigung in Bohrschen Magnetonen pro Mol

$$I_o = (4 - 6\,x)\ \mu_B \text{ für } x \leqq 0{,}5$$

$$(I_o = (2 - 2\,x)\ \mu_B \text{ für } 0{,}5 \leqq x \leqq 1)$$

GORTER hat die eingeklammerte Formel aus den oben genannten Gründen lediglich implizit angegeben. Messungen liefern für $0{,}7 > x > 0{,}2$ etwas größere Werte (NAGATA, 1962). NAGATA schließt daraus, daß sich auch einige Titanionen auf A-Plätzen befinden.

Bei oxydierten Titanomagnetiten sind nicht alle Kationen-Plätze besetzt, da im Verhältnis zu den Kationen mehr Sauerstoffionen vorhanden sind als bei den nichtoxydierten Titanomagnetiten. Trotz verschiedener theoretischer Überlegungen ist bislang nicht bekannt, wie sich die Leerstellen auf A- und B-Gitter verteilen. Möglicherweise hängt dies auch vom Entstehungsprozeß im einzelnen ab.

3. Mit Hilfe von synthetischen Proben untersuchten AKIMOTO et al. (1957) Sättigungsmagnetisierung, Curietemperatur und Gitterabstand in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung; außerhalb der Mischreihe Fe_2TiO_4-Fe_3O_4 liegende Titanomagnetite wurden durch Oxydation bei 400 bis 550°C hergestellt (AKIMOTO et al., 1957, S. 169; s. Abb. 2 - 4). Aus den eigenen Untersuchungen scheint zu folgen, daß die Auswirkung auf die Sättigungsmagnetisierung von der Temperatur abhängt, bei der der Oxydationsprozeß stattfindet (s. S. 57). Curietemperatur und Gitterabstand folgen offenbar klarer aus der chemischen Zusammensetzung, so daß sie auch bessere Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung erlauben.

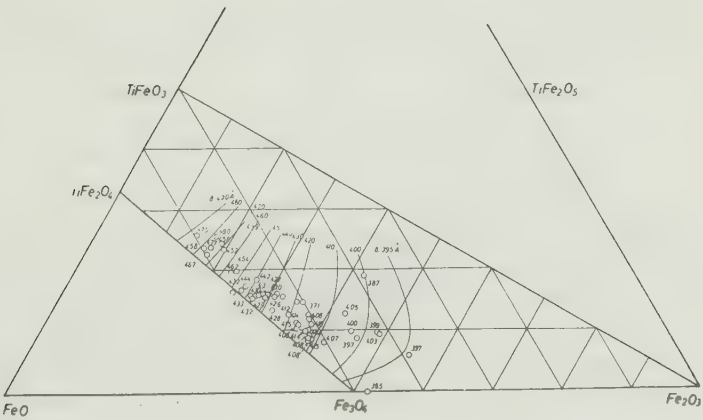


Abb. 2: Gitterabstände. Die Linien wurden aus künstlichen Proben und die Kreise aus natürlichen Proben gewonnen (nach AKIMOTO).

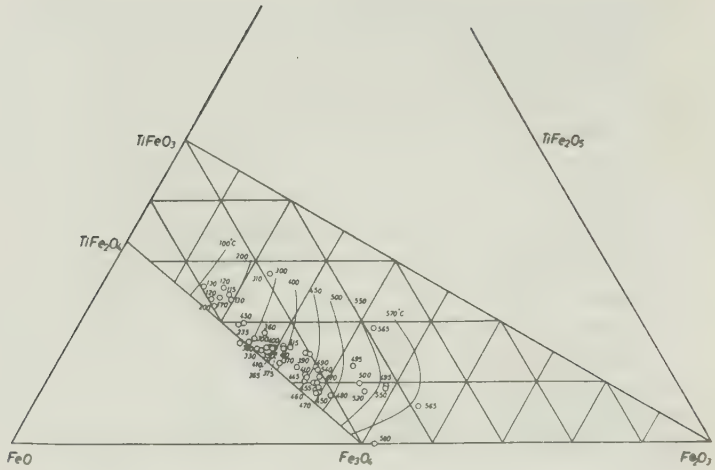


Abb. 3: Curietemperaturen. Bedeutung von Linien und Punkten wie in Abb. 2. Die Linien von Curietemperatur und Gitterabstand schneiden sich jeweils mit dem geringen Winkel von ca. 10^{o} (nach AKIMOTO).

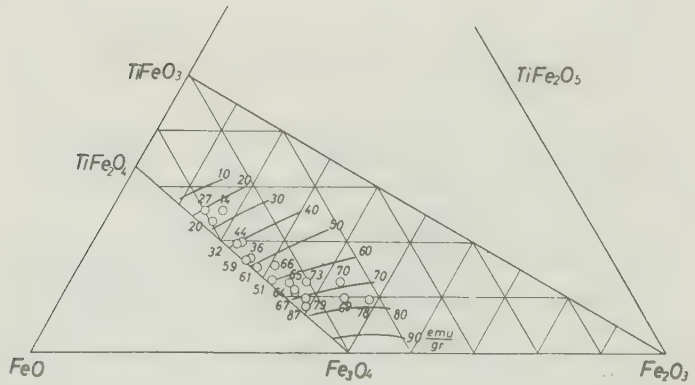


Abb. 4: Sättigungsmagnetisierung in Gcm^3/g. Bedeutung von Linien und Punkten wie in Abb. 2 (nach AKIMOTO).

2.32 Korngröße und Blochwand-Abstände

Die Titanomagnetite liegen in Basalt als Körner einer mittleren Größe von ca. 50 µ vor. SOFFEL (1964) fand in Magnetiten Blochwand-Abstände von ca. 10 µ. In Titanomagnetitkörnern von ca. 30 µ Durchmesser, die aus Gesteinen gewonnen waren, konnte er keine Blochwände feststellen (SOFFEL, S. 61). Aus seiner Untersuchung geht hervor, daß Erzkörner höchstens aus wenigen Elementarbezirken bestehen.

2.33 Relaxationszeit für die Ummagnetisierung durch thermische Schwankungen bei Eindomänen-Körnern.

1. NEEL (1955) nimmt in theoretischen Untersuchungen vereinfachend an, die magnetischen Körner bestünden aus einem einzigen Weiss'schen Bezirk und nähmen je als Ganzes an den thermischen Schwankungen teil. Dann gilt für die Relaxationszeit t_o bis zur Ummagnetisierung eines Erzkornes durch die Wärmebewegung folgende Abschätzung[+)]

$$t_o = F_o \exp (v I_s H_c / 2 k T) \text{ für } H \ll H_c$$

Dabei sind $1/F_o$ die Larmorfrequenz im Anisotropiefeld des Teilchens, ferner v, I_s und H_c Volumen, Sättigungsmagnetisierung und Koerzitivkraft des Teilchens, k die Boltzmann-Konstante, T die absolute Temperatur und H das herrschende Magnetfeld. Die Formel hat sich unter anderem zur Erklärung des Superparamagnetismus bewährt. Die Magnetisierungsrichtung von ferro- oder ferrimagnetischen Körnern unterhalb eines kritischen

---

[+)] zitiert nach KNELLER, S. 423

Volumens folgt praktisch ohne Verzögerung einer Richtungsänderung des magnetischen Feldes. Da eine remanente Magnetisierung nicht möglich ist, kommt es zu der Bezeichnung Superparamagnetismus für dieses Verhalten von Teilchen aus ferro- oder ferrimagnetischem Material.

2. Bei der A b k ü h l u n g von Basalt unter den Curiepunkt wächst $\frac{H_c I_s}{T}$ zunächst stark an. In einem engen Temperaturbereich "springt" die Relaxationszeit von sehr kleinen auf sehr große Werte. Man spricht deshalb von einer blocking temperature (etwa: Sperrtemperatur) T_b, bei der die Magnetisierung "einfriert". So läßt sich die große Stabilität der thermoremanenten Magnetisierung verstehen. Die Größe der TRM beträgt nach NEEL (1955)

$$I\,(T_r) = I_s\,(T_r) \cdot Tg_{hyp}\,\frac{v\,H_c\,I_s(T_b)}{k\,T_b}$$

Dabei bedeutet T_r die Zimmertemperatur; die übrigen Größen sind dieselben wie oben.

3. Mit den für natürliche Titanomagnetite normalen Werten+) für Sättigungsmagnetisierung von 50 G und Koerzitivkraft von 70 Oe ergibt sich bei Zimmertemperatur für Körner bis 0,095 µ Durchmesser eine R e l a x a t i o n s z e i t bis 1 Jahr und für Körner über 0,107 µ eine Relaxationszeit von über $25 \cdot 10^6$ Jahren. Wahrscheinlich gibt es überhaupt keine derart kleinen Körner.

+) Nach KNELLER beträgt die Larmorfrequenz im Anisotropiefeld eines ferromagnetischen Teilchens 10^9 sec^{-1}, dieser Wert wurde auch hier benutzt, da das kritische Volumen dadurch praktisch nicht beeinflußt wird.

2.34 Wandverschiebungen

Den Quotienten aus der durch das Erdfeld reversibel induzierten Magnetisierung und der natürlichen Remanenz bezeichnet man als Königsbergerschen Q-Faktor. Er beträgt meisten ca. 1/10. Es ist anzunehmen, daß die bei normaler Temperatur durch geringe Feldstärke induzierte Magnetisierung aus Wandverschiebungen resultiert. Ebenso sind isothermale Remanenzen, die durch geringe Feldstärken hervorgerufen worden sind, auf Wandverschiebungen zurückzuführen. Dies kann durch Tieftemperaturbehandlung (MINORU OZIMA/ MITUKO OZIMA, 1965) gezeigt werden.

2.35 Unterscheidung von TRM und IRM

Die Kristallanisotropie verschwindet für Magnetit bei einer Temperatur von -143°C; damit ergibt sich für die Koerzitivkraft ein Minimum. Magnetostatisch günstige Wandverschiebungen finden statt. Eine schwache isothermale Remanenz (IRM) wird fast vollständig bei Unterschreiten dieser Temperatur entfernt. Nicht zu starke Thermoremanenzen können fast vollständig verbleiben. Stärkere Thermoremanenzen bleiben zu einem geringeren Anteil erhalten. Die TRM kommt demnach zunächst bevorzugt durch Bezirksdrehung von Eindomänenkörnern zustande. Das Verhalten von TRM und IRM wird für hohe Remanenzen schließlich identisch, bei der maximalen Remanenz kann nicht mehr auf die Art des Magnetisierungsprozesses zurückgeschlossen werden.

2.36 Abhängigkeit der TRM von der Korngröße

Aus dem vorhergehenden Abschnitt ergibt sich: Bei Abkühlung im gleichen Feld muß die TRM von Vieldomänen-Körnern kleiner sein als von Eindomänen-Körnern bei gleichem Gesamtvolumen. Das entspricht Untersuchungen von PARRY (1965) an künstlichen Magnetitkörnern jeweils einheitlicher Größe. Damit diese ebenso wie natürliche Erzkörner voneinander unabhängig waren, wurden sie in eine unmagnetische Matrix eingebettet. PARRY fand bei Verringerung der Korngröße auf 10 bis 20 μ einen Anstieg der TRM und schließt daraus, daß hier ein Übergang von Vieldomänen- zu Eindomänen-Verhalten vorliegt.

3. Magnetische Untersuchungen

3.1 Auswahl von Basaltsäulen.

1. Für eine Änderung der magnetischen Eigenschaften im Laufe der Zeit wird der V e r g l e i c h z w i s c h e n B a s a l t s ä u l e n v e r s c h i e d e n e n A l t e r s wichtige Anhaltspunkte liefern. Autoren, wie hauptsächlich AKIMOTO und Mitarbeiter, untersuchten Prozesse bei erhöhter Temperatur. Eine Extrapolation auf tiefere Temperaturen und längere Zeiten führt in diesem Fall auf den eigentlich interessierenden Ablauf. Bei Erhitzungsversuchen erwies sich eine logarithmische Zeiteinteilung als zweckmäßig (s. BEWERSDORFF, 1961; MEITZNER, 1963). Deshalb wurden für die vorliegende Arbeit zum Vergleich Basaltsäulen mit einem Alter von ca. 10^7 Jahren aus der Göttinger Umgebung und rezente Basaltsäulen mit einem Alter von ca. 10^2 bis 10^4 Jahren aus Island benutzt.

2. Die M a ß e d e r B a s a l t s ä u l e n werden durch folgende Forderungen festgesetzt:

   a. Die Basaltsäulen müssen eine genügende Zahl von hinreichend großen Proben innerhalb eines Querschnittes liefern, damit systematische Unterschiede der Meßgrößen gesichert werden können.

   b. Die Säulen sollen möglichst normale Form haben, das heißt die Säulenlänge soll größer als der Säulendurchmesser sein.

   Die verwendeten Basaltsäulen haben einen Durchmesser von 20 - 40 cm. Die Meßergebnisse zeigen, daß bei der Benutzung kleinerer Säulen unregelmäßige Unterschiede der magnetischen Eigenschaften bereits eine zu große Rolle spielen könnten (s. Tabelle 1, Seite 18).

3.2 Meßapparaturen

Geräte und Geräteteile aus industrieller Serienfertigung werden nicht beschrieben, da ihre Arbeitsweise hinreichend bekannt ist oder aus Gebrauchsanweisungen und Prospekten entnommen werden kann.

Förstersonde

Zur Messung der natürlichen Remanenz wurde eine Förstersonde mit einem von MEITZNER (1961, S. 62) stammendem Aufbau benutzt. Zwei Sonden sind im Abstand von 1 m in einem unmagnetischen waagerecht gelagerten zylindrischen Rohr untergebracht und in der Rohrachse antiparallel justiert. Bei dieser Gradientenschaltung ergibt das hier als homogen zu behandelnde Erdfeld keinen Ausschlag am Instrument.

	Rand	Mitte
Grefenburg	1-2 Proben	1 Proben
Steinberg/Meensen	2 "	1 "
Dettifoss	1-2 "	1 "
Ellidaar	36 "	4 "
Godafoss	8 "	2 "
Rauda	4 "	1/2-1 "
Skeljafell	4 "	16 "
Djorsar	36 "	1/2-1 "
Holmur 1	7 "	1/2-1 "
Holmur 2	4 "	1 "

Tabelle 1: Zahl der Proben, die notwendig wären, um bei der später festgestellten Streuung der Meßergebnisse diese statistisch abzusichern. Dabei wurde davon ausgegangen, daß die zufällige Streuung höchstens 1/3 des Unterschiedes zwischen dem Ergebnis für den Rand und die Mitte der Basaltsäule betragen sollte. Zur Aufstellung der Tabelle wurden die Ergebnisse für die natürliche Remanenz benutzt. Das Probengewicht beträgt jeweils ca. 70 g.

Bei dieser statistischen Rechnung wurden jeweils sämtliche Proben des Randes (oder der Mitte) berücksichtigt. Wenn ersichtlich lediglich ein zusammenhängender Teil des Randes Unterschiede gegenüber dem restlichen Basalt zeigt, dann wird zweckmäßiger eine Einteilung vorgenommen, wie sie bei den Abbildungen für Djorsar (s. S. 36) und Ellidaar (s. S. 44) angedeutet ist.

Um gegenüber den Meßsonden eine definierte Entfernung und Lage der Proben zu erreichen, wurde ein Aufbau von Fromm benutzt. Dabei ist das Rohr in einer Halterung festgeklemmt. Der Schwerpunkt der Meßprobe wird mittels eines in der Höhe verschiebbaren Tisches in die Rohrachse außerhalb der beiden Sonden gebracht. Gemessen wird so die Feldkomponente in Richtung der beiden Sonden, wobei das Feld der Probe am Orte der weiter entfernten Sonde vernachlässigbar ist. Das ergibt die Magnetisierungskomponente in Untersuchungslinien-Richtung, da Probenabstand und -volumen bekannt sind. Normalerweise wird das Rohr in magnetischer Ost-West-Richtung aufgestellt, so daß in der Meßrichtung keine induzierte Magnetisierung auftritt. Soll die Suszeptibilität mittels vom Erdfeld induzierter Magnetisierung bestimmt werden, so wird das Rohr in magnetischer Nord-Süd-Richtung aufgestellt. Die Genauigkeit der Messung hängt von der Länge der (vorderen) Sonde (3 cm), den Abmessungen der Probe (Würfel der Kantenlänge 3cm), und der Entfernung Sonde - Probe (ca. 8 cm) ab. Aus diesen Werten ergibt sich aber lediglich ein Fehler für die Eichung, der für alle Proben gleich groß ist.

Die tatsächliche Genauigkeit der einzelnen Messung hängt davon ab, wie genau der Schwerpunkt der Probe auf den Meßort gebracht wird. Bei den Serienmessungen wurde jeweils die Entfernung der hinteren Probenkante zur Sonde konstant gehalten. Bei einer Abweichung der Proben-Kantenlänge von 1 mm resultiert daraus ein Fehler von ca. 4 %. Inhomogenitäten der Magnetisierung wurden weitgehend durch eine zweite Messung eliminiert, zu der die Probe um 180° gegen die Untersuchungslinien-Richtung gedreht wurde.

Diese Angaben gelten ungefähr bis zur Empfindlichkeit 10 γ/Skt. Magnetisierung (= 1 γ/Skt. Feld). Bei höherer Empfindlichkeit wird der Fehler größer, da die Leistungsgrenze des Gerätes erreicht wird. Dieser zusätzliche Fehler beträgt ca. 2 γ für die Magnetisierung (= 0,2 γ Feld).

Abmagnetisierungs-Apparatur

Die Abmagnetisierung im Wechselfeld erfolgte mit einer von TREU gebauten Apparatur. Sie ermöglicht Effektivwerte des Wechselfeldes bis über 2000 Oe. Drei Helmholtzspulen dienen zur Kompensation der drei Komponenten des Erdfeldes. Ein Schwingkreis, der auf 50 Hz abgestimmt ist, dient zum Herausfiltern der Netz-Grundfrequenz und ein Regel-Trafo zur Gewinnung der Spannung bis maximal ca. 2000 V an der Abmagnetisierungsspule.

Messung der Sättigungsmagnetisierung

Zur Messung der Sättigungsmagnetisierung diente einMagnet mit einer maximalen Feldstärke von ca. 10 000 Oe. Das Meßprinzip stammt von LANGHOFF (1957): Die Probe wird im homogenen Feld mit einer Frequenz von 4,3 Hz und einem Hub von 3 cm auf und ab bewegt. Dabei wird in vier an den Polschuhen angebrachten Meßspulen eine Spannung induziert, die über einen Verstärker und einen Vierweg-Gleichrichter mit einem Galvanometer gemessen wird. Die Empfindlichkeit kann jeweils auf einen gut ablesbaren Galvanometer-Ausschlag eingestellt werden. Eine Eichung kann mit einer ähnlich wie die Probe geformten Gleichstrom-Spule oder mit einer Probe bekannter Sättigungsmagnetisierung erfolgen. Die kleinste mit dem Gerät meßbare Magnetisierung beträgt ca. 100 γ.

Eine um den Probenbehälter gebaute elektrische H e i z u n g, die durch einen Thermostaten einreguliert wird, ermöglicht es, die Sättigungsmagnetisierung bis über 600°C zu messen. Die Probe wird auf die gewünschte Temperatur in einem größeren elektrischen Ofen gebracht, wo Wärmeverluste nach außen vermieden und eine gleichmäßige Aufheizung erreicht wird. Die meisten Curie-Temperaturen liegen zwischen 150 und 200°C. Da Basalt ein schlechter Wärmeleiter ist, kann die Probe bei derartigen Temperaturen praktisch ohne Wärmeverlust in den Ofen zwischen den Polschuhen gebracht werden. Durch gleichzeitige Vorerhitzung von zwei Proben, die miteinander verglichen werden sollen, können diese bei verschiedenen Temperaturen jeweils kurz hintereinander gemessen werden.

Messung der Koerzitivkraft

In der Probe wird zunächst mit dem oben beschriebenen Magneten eine isothermale S ä t t i g u n g s r e m a n e n z hergestellt. Zur Erzeugung der Koerzitivfeldstärke dient eine eisenfreie Spule, die an eine kontinuierlich regelbare Gleichspannung angeschlossen ist. Die magnetische Feldstärke wird aus der Stromstärke der Spule errechnet. Außerhalb der Spulenachse befinden sich an symmetrischen Plätzen zwei Förstersche Sonden in Gradientenschaltung. Ihre Meßrichtung ist senkrecht zur Spulenachse. Das Erdfeld und das magnetische Feld der Spule üben also keine Wirkung auf das Sondenpaar aus. Bringt man eine magnetisierte Probe auf einen Platz der Spulenachse außerhalb der Sondenlinie, so wird eine Komponente ihres Feldes von den Sonden gemessen. Das magnetische Gleichfeld wird heraufgeregelt bis der Ausschlag an der Förstersonde verschwindet, dann ist die Koerzitivfeldstärke erreicht.

3.3 Meßergebnisse

3.31 Gesamtübersicht

Die Tabellen 2 und 3 sollen einen Überblick über die Meßergebnisse liefern. Die aufgeführten Werte sind Mittelwerte aus Proben von dem Rande und dem Innern der Basaltsäulen. Zu ihrer Gewinnung wird eine E i n t e i l u n g folgendermaßen vorgenommen: Ein Säulenquerschnitt wird in mehrere Zonen eingeteilt, deren äußere dem Verlauf des Randes angepaßt ist (s. Abb. 5). Die Zweckmäßigkeit dieser Einteilung ist aus den Einzelmessungen zu ersehen. Dort, wo größere Unterschiede vorliegen, ergibt sich sofort, daß sie der gewählten Einteilung entsprechen.

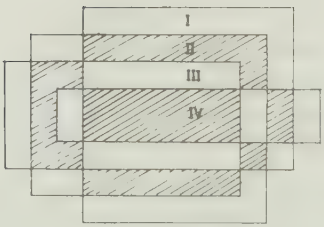


Abb. 5: Steinberg II Zoneneinteilung

Tabelle 2

	Alter	Erzgehalt in %	Remanenz[1]	Koerzitivkraft bzw. Suszeptibilität	Sättigung[1]	Sättigung[2]	I_r/I_s[3]
Grefenburg	10^7 a	2,8	$300 \cdot 10^{-5}$ G	10^{-3} Susz.	2,5 G	15 Gcm^3/g	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Steinberg/M.	10^7	6,6	200		2	5	1
Skeljafell	10^5	3	-	60 Oe	2	10	-
Dettifoss	ca. $3 \cdot 10^4$	4,4	1500	$0,2 \cdot 10^{-3}$ Susz.	2	7	7,5
Ellidaar	ca. $0,5\text{-}1 \cdot 10^4$	2,5	750	70 Oe	1	7	7,5
Godafoss	ca. $0,5\text{-}1 \cdot 10^4$	2,1	1300	90 Oe	6	50	2
Rauda	ca. $0,5\text{-}1 \cdot 10^4$	2,4	1000		1	7	10
Skeljafell	ca. $0,5\text{-}1 \cdot 10^4$	3,3	500		2	10	2,5
Djorsar	ca. $0,5\text{-}1 \cdot 10^4$	4,4	1700	80 Oe	2	7	8,5
Holmur A	182	1,5	1100	10^{-2} Susz.	2	20	5,5
Holmur B	182		800		2		4

[1] auf das Gestein bezogen

[2] auf das Erz bezogen

[3] Remanenz/Sättigung

Tabelle 3

	Alter	Remanenz-Rand / Remanenz-Mitte	Koerzitivkraft-Rand / Koerzitivkraft-Mitte	Sättigung-Rand / Sättigung-Mitte	NRM-Richtungsdifferenz Rand - Mitte
Grefenburg	10^7 a	49 %	135 %	85 %	1^o 2)
Steinberg	10^7	60	160+)	86	1^o
Skeljafell	10^5	-	108	101,5	-
Dettifoss	$3 \cdot 10^4$	119	110+)	106+)	1^o
Ellidaar	$0{,}5\text{-}1 \cdot 10^4$	106	94 3)	103	$1{,}5^o$
Godafoss	$0{,}5\text{-}1 \cdot 10^4$	108	106	86	0^o
Rauda	$0{,}5\text{-}1 \cdot 10^4$	106	102	100	1^o
Skeljafell rez.	$0{,}5\text{-}1 \cdot 10^4$	116	-	101	0^o 2)
Djorsar	$0{,}5\text{-}1 \cdot 10^4$	103	112	104	1^o
Holmur A	182	106	102 3)	100	1^o
Holmur B	182	106	-	102	2^o

1) Einzelmessung

2) nach Abmagnetisierung von viskoser Magnetisierung

3) aus der Suszeptibilität nach der Faustformel $H_c = k\frac{I_s}{\chi}$ berechnet, k ist eine Konstante

3.311 Natürliche Remanenz

Die NRM weist die größten Unterschiede auf. Die tertiären Basaltsäulen zeigen am Rande wesentlich niedrigere Werte als in der Mitte; die rezenten Basalte ergeben dagegen etwas höhere Werte der Remanenz am Säulenrande. Die Magnetisierungsrichtung unterscheidet sich bei allen Säulen innerhalb eines Querschnittes nur sehr wenig, der Unterschied liegt innerhalb der Fehlergrenze.

3.312 Sättigungsmagnetisierung

Die Sättigungsmagnetisierung zeigt im allgemeinen bei gleichem Vorzeichen Unterschiede mit geringerem Betrag als die Remanenz; bei den tertiären Säulen betragen die Unterschiede der Sättigungsmagnetisierung nur ca. 1/3 derjenigen bei der NRM. Nur bei der Säule vom Godafoss haben die Unterschiede von NRM und Sättigung verschiedenes Vorzeichen: Eine stärkere Remanenz entspricht hier ausnahmsweise einer schwächeren Sättigung am Säulenrande.

3.313 Koerzitivkraft

Die Koerzitivkraft ist für tertiäre und rezente Basaltsäulen am Rande höher als in der Mitte, mit Ausnahme der Säule von Ellidaar. Bei den tertiären Basalten ergeben sich hier ebenfalls größere Unterschiede als bei den rezenten.

3.314 Curietemperatur

Die Curietemperatur beträgt für alle Basalte ca. 150 bis 200°C, mit Ausnahme der Säule vom Godafoss, die auch sonst ein abweichendes Verhalten zeigt. Bei den tertiären Basaltsäulen sind für den Rand deutlich

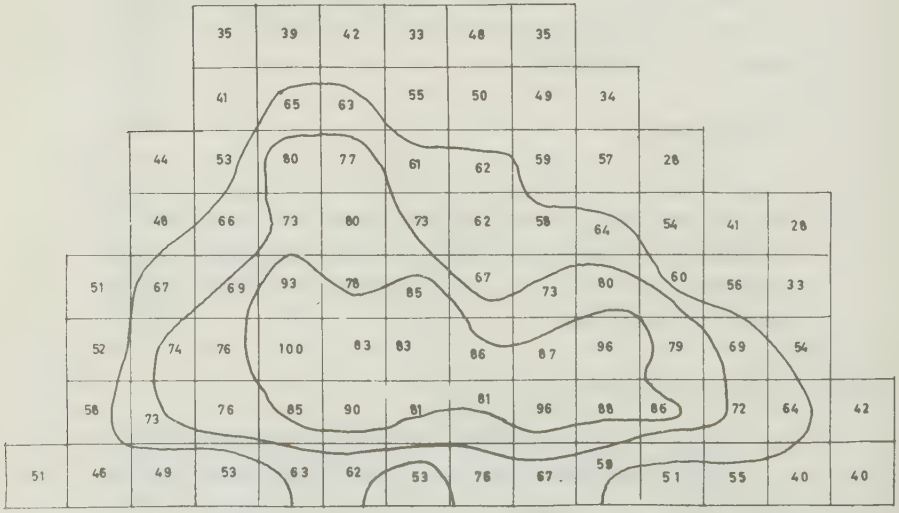
höhere Curietemperaturen festzustellen. Bei den rezenten Basaltsäulen sind zum Teil die Curietemperaturen am Rande zwar ebenfalls etwas höher, in anderen Fällen sind jedoch keine Unterschiede gegenüber der Säulenmitte feststellbar.

3.32 Einzelergebnisse der tertiären Basaltsäulen

Nach der vorangegangenen Übersicht genügt es hier, diese durch die Einzelergebnisse zu belegen. Eine Diskussion erfolgt in den späteren Kapiteln.

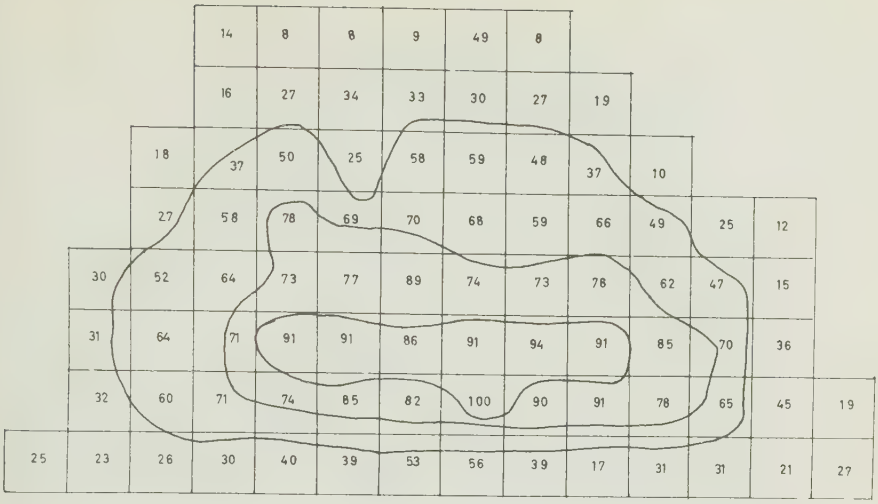
3.321 Grefenburg

Die Säulenquerschnitte wurden alle derselben Basaltsäule entnommen, sie werden durch römische Ziffern gekennzeichnet.



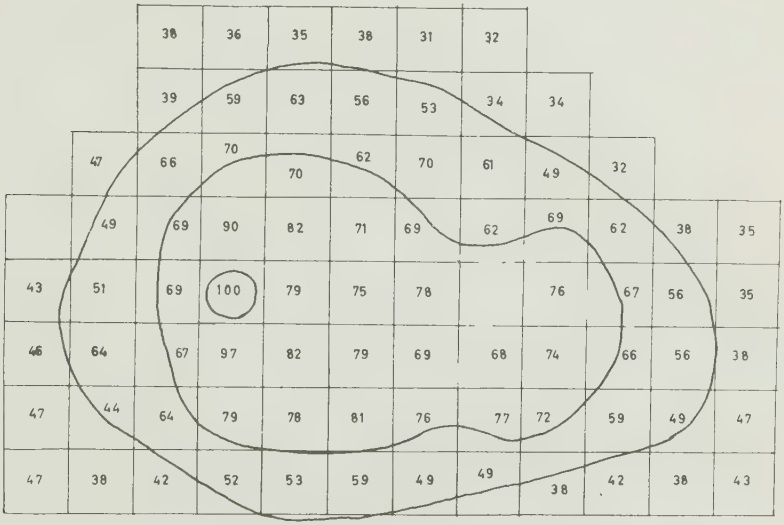
Grefenburg V Remanenz in % des Maximalwertes

Abb. 6: Kantenlänge der Probenwürfel ca. 3 cm, ebenso bei den folgenden Abbildungen.



Grefenburg V Viskose Magnetisierung in % des Maximalwertes

Abb. 7



Grefenburg VI Remanenz in % des Maximalwertes

Abb. 8

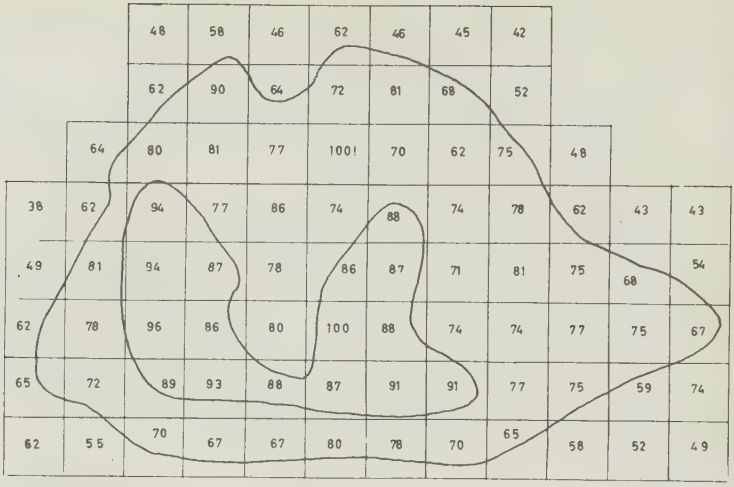
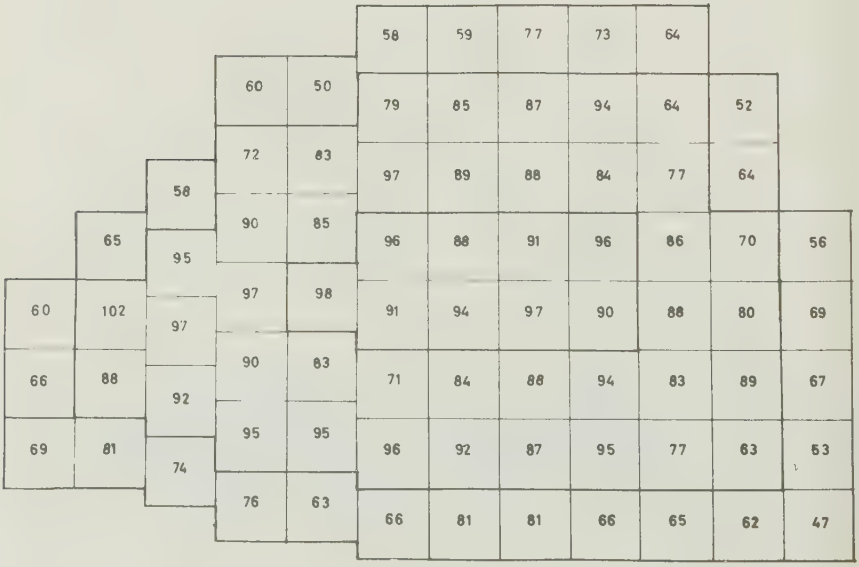
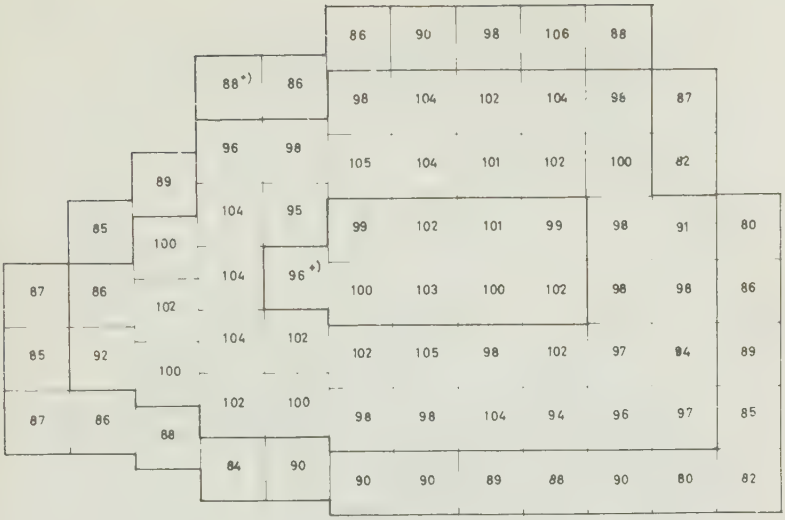


Abb. 9 Grefenburg VI Anfangssuszeptibilität in % des Maximalwertes



Grefenburg II natürliche Remanenz

Abb. 10



Grefenburg II Sättigungsmagnetisierung

Abb. 11: Einheit ≈ 0,025 G

+) Diese beiden Proben wurden für Abb. 12 verwendet

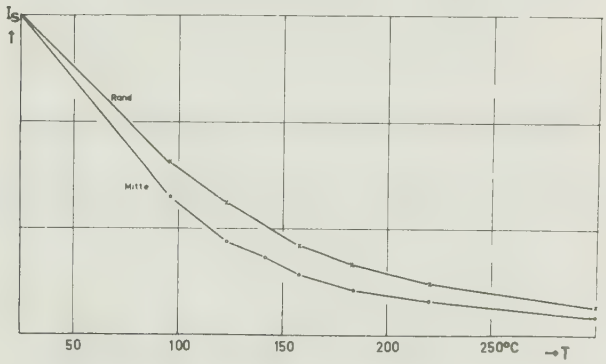
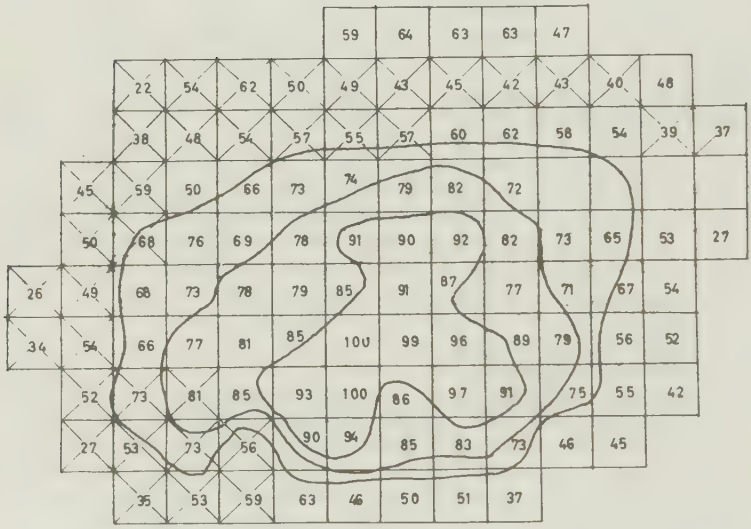


Abb. 12: Grefenburg, Sättigungsmagnetisierung in Abhängigkeit von der Temperatur

3.322 Steinberg/Meensen

Die Säulenquerschnitte wurden alle einer Basaltsäule entnommen.



Steinberg V Remanenz in % des Maximalwertes

Abb. 13: Die markierten Proben sind von Rissen durchzogen.

	78	84	87	84	83	80	80	81	60			
63	93	93	97	93	92	85	79	91	91	76		
87	88	92	95	93	85	87	90	90	87	93	72	
93	91	95	100	91	84	99	94	93	91	88	89	
90	95	97	94	89	93	95	96	84	91	97		
82	94	98	93	94	90	94	96	80	92	92	90	55
	98	97	96	96	96	93	94	88	79	91	93	
	87	98	96	93	96	95	88	91	87	85	63	
		73	75	73	72	78	78	81	69			

SteinbergIV Sättigungsmagnetisierung bei 20°C. in % des Maximalwertes

Abb. 14

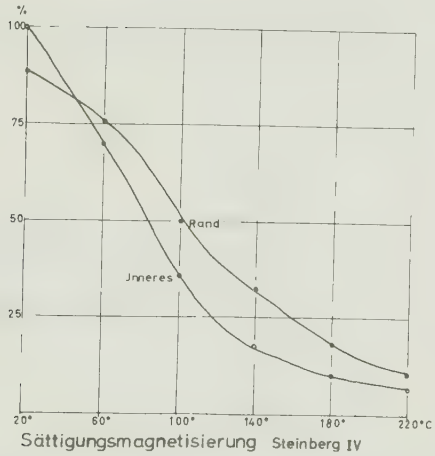
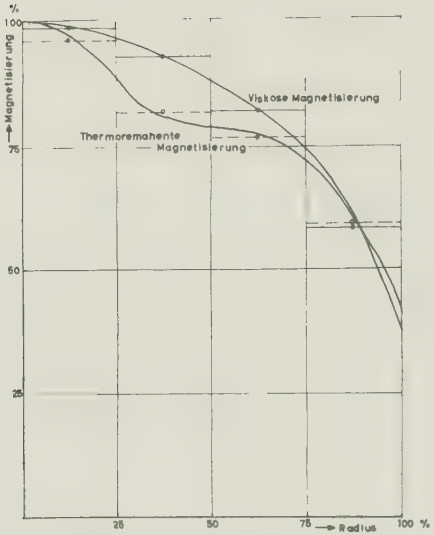


Abb. 15: Sättigungsmagnetisierung in Abhängigkeit von der Temperatur.



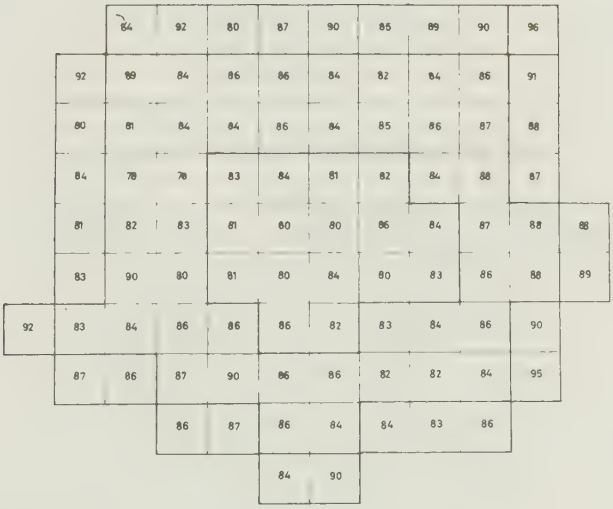
Thermoremanente und viskose Magnetisierung in Abhängigkeit vom Abstand zum Zentrum des Säulenquerschnitts Steinberg II

Abb. 16: vgl. Abb. 49 und 50 auf S. 70

3.33 Einzelergebnisse der rezenten Basaltsäulen aus Island

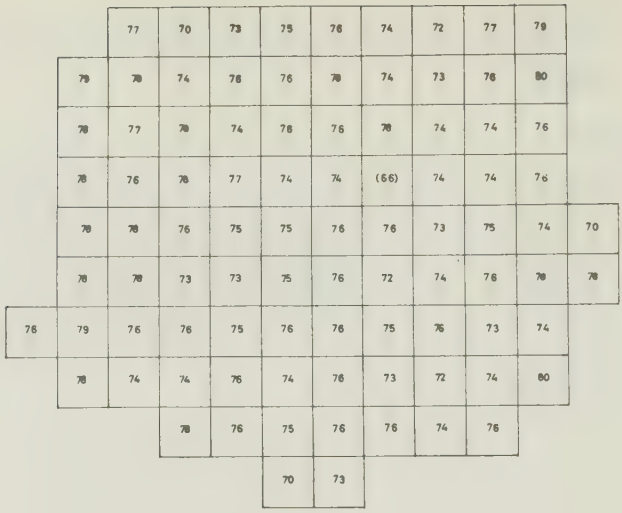
3.331 Holmur

Fundort: Hinter dem Bauernhof Holmur auf der Insel im Flusse Skafta (18° 6' w.L., 63° 47' n.B., in der Nähe von Kirkjubaejarklaustur). Bei der Säule "Holmur A" ist die Länge kleiner als der Durchmesser. Deshalb wurde noch als zweite die Säule "Holmur B" untersucht, die normale Abmessungen aufweist.



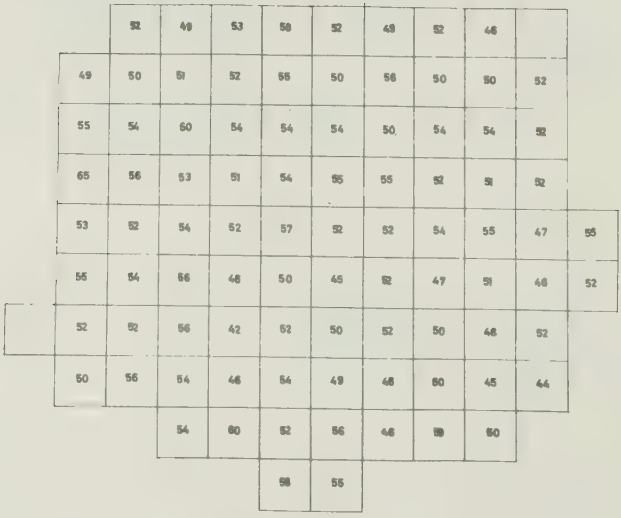
Holmur A natürliche Remanenz

Abb. 17: Einheit $\simeq 13 \cdot 10^{-5}$ G



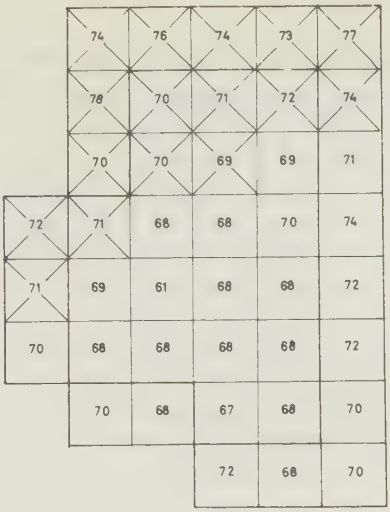
Holmur A Sättigungsmagnetisierung

Abb. 18: Einheit ≈ 0,03 G



Holmur A Suszeptibilität

Abb. 19: Einheit $2 \cdot 10^{-4}$



Holmur B natürliche Remanenz

Abb. 20: Einheit $\approx 15 \cdot 10^{-5}$ G
Die markierten Proben sind von Rissen durchzogen

Holmur B Sättigungsmagnetisierung

Abb. 21 (Einheit = $2{,}5 \cdot 10^{-2}$ G)

3.332 Djorsar

Fundort: nahe der Djorsar-Brücke, ca. 100 m flußabwärts am rechten Ufer (ungefähr 20° 40' w.L., 63° 56' n.B.).

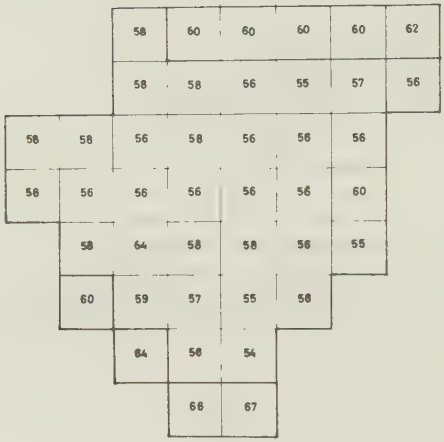


Abb. 22: Djorsar, natürliche Remanenz
(Einheit ≈ 30 · 10^{-5} G)

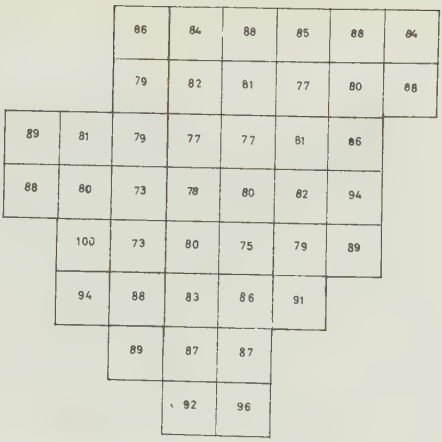


Abb. 23: Djorsar, Koerzitivkraft
(Einheit ≈ 1 Oe)

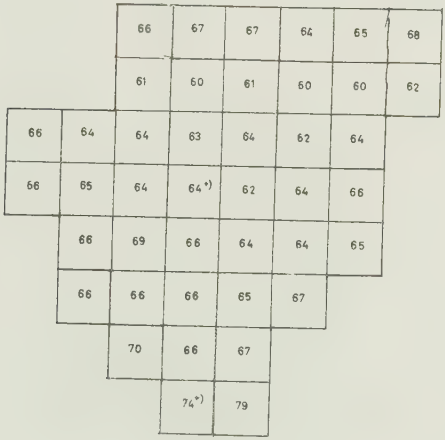


Abb. 24: Djorsar, Sättigungsmagnetisierung
(Einheit ≈ 0,03 G)

*) Diese Proben wurden für Abb. 25 benutzt.

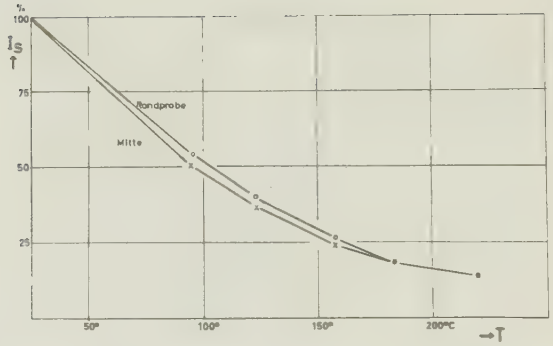


Abb. 25: Djorsar, Sättigungsmagnetisierung in Abhängigkeit von der Temperatur (Normierung auf denselben Anfangswert).

3.333 Skeljafell rez.

Fundort: Berg Skeljafell (19° 49' w.L., 64° 7' n.B.). Die Magnetisierungsrichtung der Säule ist invers; die andere (ältere) Basaltsäule vom Skeljafell trägt eine Blitzmagnetisierung (s. Abb. 41 und 44 auf S. 47). Es kann hier aber keine Ursache für die inverse Magnetisierungsrichtung eindeutig angegeben werden. In diesem Zusammenhang ist mehr von Interesse, daß die magnetischen Eigenschaften denselben Zusammenhang mit der Säulensymmetrie wie bei den anderen rezenten Basalten zeigen. Die übrigen untersuchten rezenten Basalte sind alle entsprechend dem heutigen Erdfeld magnetisiert.

	95	99	100	95	101	108
97	92	86	86	85	84	105
93	90	85	83	84	89	98
96	88	81	80	82	84	90
102	86	82	80	82	84	90
	91	85	82	83	83	94
	100	86	82	82	86	92
		86	81	85	101	
			82	85		

Skeljafell rez. natürliche Remanenz
(Einheit = $6 \cdot 10^{-5}$G)

Abb. 26

	70	63	64	60	62	62
70	62	63	62	60	62	60
62	62	63	64	60	63	64
65	62	63	64	62	62	60
64	63	64	62	60	62	62
	62	64	64	62	62	62
	66	66	61	62	63	63
		65	64	62	65	
			65	65		

Skeljafell rez. Sättigungsmagnetisierung

(Einheit = $3 \cdot 10^{-2}$ G)

Abb. 27

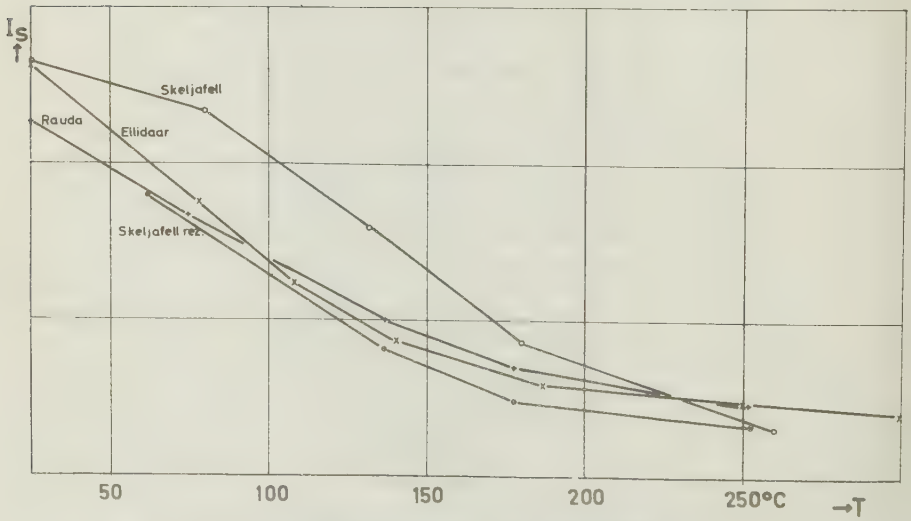


Abb. 28: Sättigungsmagnetisierung in Abhängigkeit von der Temperatur

3.334 Rauda

Fundort: An dem Wasserfall des Flusses Rauda auf dem rechten Ufer (ca. 19° 45' w.L., 64° 10' n.B.).

71	66	67	66	67	67
68	64	63	64	65	64
70	64	65	63	62	64
67	60	62	62	62	64
68	63	62	61	62	63
67	66	62	62	62	65
	64	62	64	62	65
		62	60	62	

Rauda natürliche Remanenz

(Einheit = 15 10^{-5}G)

84	81	81	81	79	78
87	77	83	79	79	78
88	86	85	82	83	85
83	81	83	83	82	84
83	84	83	81	83	81
82	81	81	82	81	83
	83	81	83	81	82
		83	80	80	

Rauda Sättigungsmagnetisierung

(Einheit = 1,2 $\cdot 10^{-2}$ G)

82	93	86	92	89	91
81	84	81	85	90	94
84	86	89	88	88	91
84	84	88	89	90	88
86	90	91	91	85	88
88	84	84	87	88	89
	90	85	90	90	85
		85	85	90	

Rauda Koerzitivkraft (Einheit = 1 Oe)

Abb. 29 - 31

3.335 Godafoss

Fundort: Unterhalb des Wasserfalles Godafoss (Nordisland) auf dem rechten Ufer.

Godafoss natürliche Remanenz

Abb. 32: Einheit $\approx 14 \cdot 10^{-5}$ G

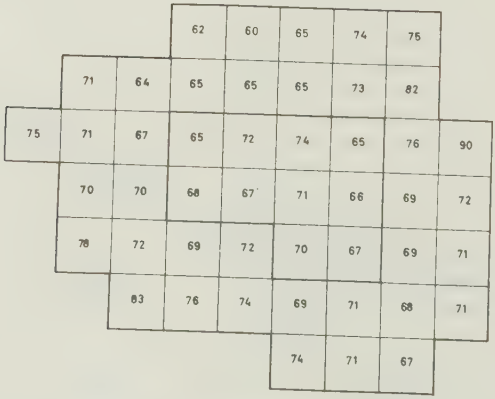


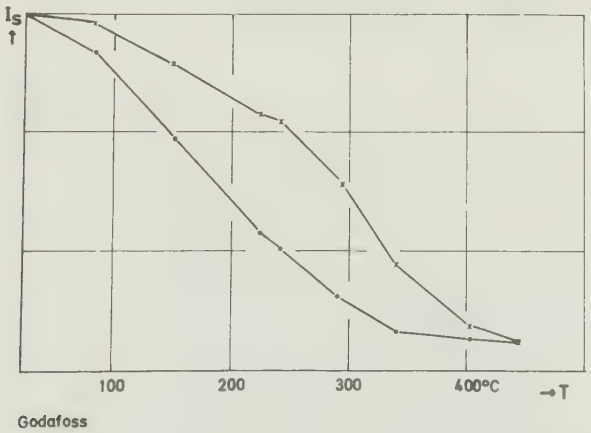
Abb. 33 Godafoss Koerzitivkraft (Einheit = 10e)

			79	75	74	61	62	
		69	75	79	80	73	63	45	
63		67	69	77*)	76	70	65	55	28*)
		67	68	68	64	65	64	62	59
		51	61	57	56	60	61	64	62
			41	50	51	50	57	65	65
						51	53	66	

Godafoss Sättigungsmagnetisierung

Abb. 34: Einheit $\approx 0{,}9 \cdot 10^{-1}$ G

*) Diese beiden Proben wurden für Abb. 35 verwendet.



Godafoss

Abb. 35: Sättigungsmagnetisierung in Abhängigkeit von der Temperatur (x Probe vom Säulenrande, o Probe aus der Säulenmitte). Die Kurven wurden auf denselben Anfangswert normiert.

3.336 Ellidaar

Fundort: Am Wasserfall des Flusses Ellidaar (Stadtrand von Reykjavik) auf dem linken Ufer.

65	61	69	76	78	75	73
57	58	59	53	59	59	67
58	59	60	59	56	55	61
60	58	61	61	57	64	61
61	54	56	58	56	53	56
62	58	56	56	53	55	
54	51	57				
	59					

Ellidaar natürliche Remanenz

(Einheit = 13 10^{-5} G)

Abb. 36

44	42	46	53	54	46	39
32	33	35	45	42	42	43
33	37	30	33	33	35	40
35	33	36	39	39	38	40
37	33	35	32	39	41	35
32	30	29	28	34	31	
31	32	29				
	34					

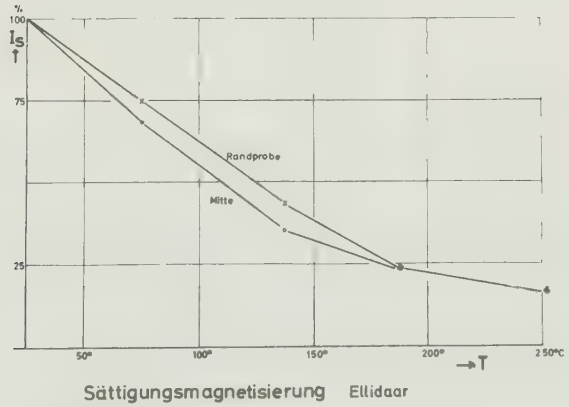
Abb. 37 Ellidaar Suszeptibilität (Einheit = $0{,}6 \cdot 10^{-7}$)

76	71	77	81	87	84*)	85
73	74	74	75	74	74	76
74	77	76	77	74	75	75
73	72	70	70*)	69	72	72
72	69	70	70	71	72	73
77	73	71	73	71	70	
70	68	67				
	67					

Ellidaar Sättigungsmagnetisierung

(Einheit = $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ G)

Abb. 38: *) Diese Proben wurden für Abb. 39 verwendet.



Sättigungsmagnetisierung Ellidaar

Abb. 39: Sättigungsmagnetisierung in Abhängigkeit von der Temperatur

3.337 Dettifoss

Fundort: Am Wasserfall Dettifoss (Nordisland) auf dem rechten Ufer.

Dettifoss natürliche Remanenz (Einheit = $30 \cdot 10^{-5}$ G)

Abb. 40

3.338 Skeljafell

Wie sich aus der Magnetisierungsrichtung ergibt (s. Abb. 41), handelt es sich hier um eine Blitzschlagmagnetisierung[+]. Für diese Abbildung wurden die Würfelflächen in die zur Blitzrichtung senkrechte Ebene projiziert (deshalb Parallelogramme statt Quadrate). Die anderen magnetischen Eigenschaften zeigen eine normale Abhängigkeit vom Ort der Probe in der Säule (s. Abb. 42 und 43).

[+] Aus der Magnetisierungsrichtung ergibt sich die Stromrichtung, und zwar verlief diese von oben nach unten. Aus Abb. 44 folgt die Blitzstärke.

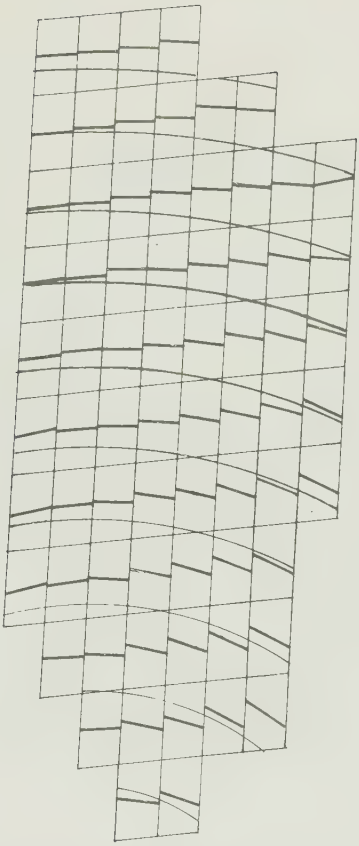
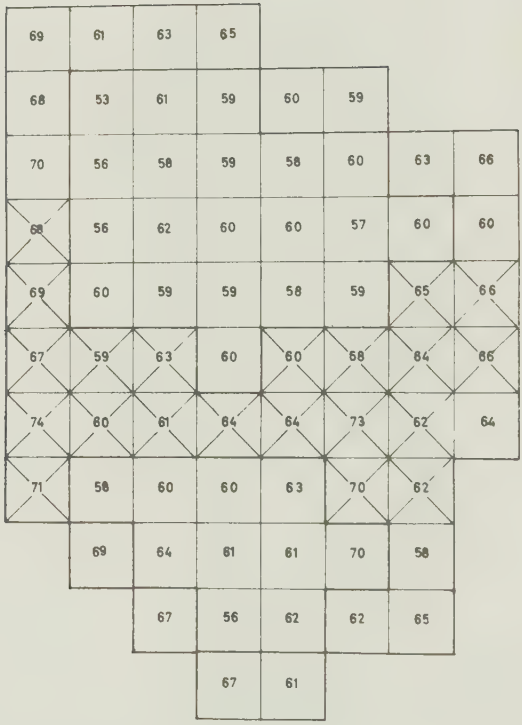
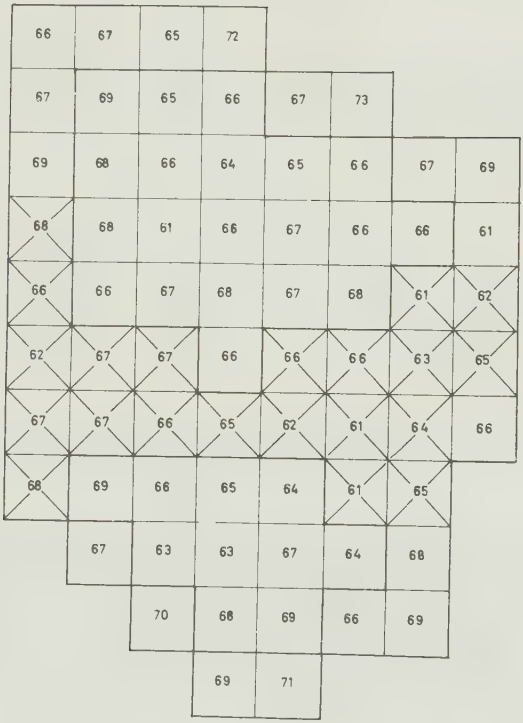


Abb. 41: Die dick ausgezogenen Striche stellen die Magnetisierungsrichtung dar. Der Weg des Blitzes verlief durch den Mittelpunkt der Kreise.



Skeljafell Koerzitivkraft

Abb. 42: Einheit ≈ 1 Oe.
Die markierten Proben sind von Rissen durchzogen.



Skeljafell Sättigungsmagnetisierung

(Einheit $\approx 3 \cdot 10^{-2}$ G)

Abb. 43: Vgl. den Text zu Abb. 42.

Die markierten Proben zeigen hier nicht eine Erhöhung der Sättigungsmagnetisierung wie die rezenten Basalte am Säulenrande, sondern eine Verringerung wie die tertiären Basalte.

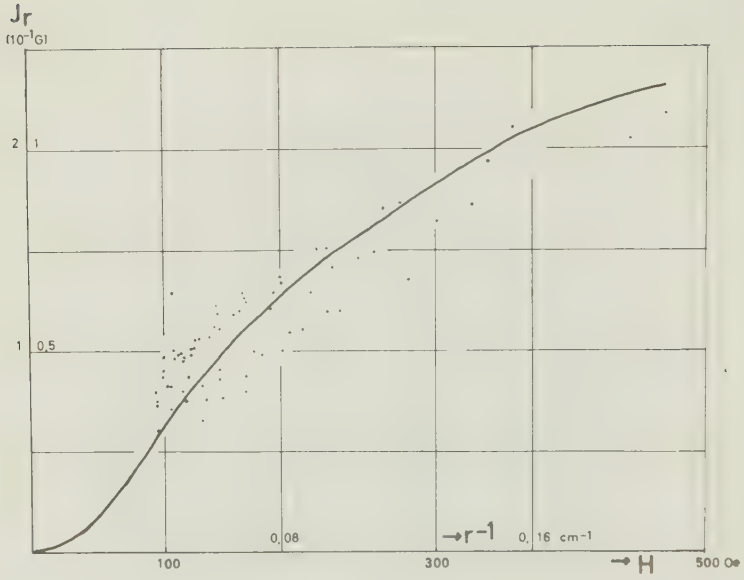


Abb. 44: Die Punkte stellen die natürliche Remanenz (rechte Ordinatenbeschriftung) in Abhängigkeit vom reziproken Abstand dar, die ausgezogene Kurve zeigt für dieselben Proben die isothermale Remanenz (linke Ordinatenbeschriftung) in Abhängigkeit von der angelegten Feldstärke. Der Vergleich ergibt die Blitzstärke zu ca. 10 000 A.

4. Chemische und kristallographische Untersuchungen

4.1 Experimentelle Ergebnisse

4.11 Erzmikroskopische Beobachtungen

Auf einen Anschliff wurde ein Netz äquidistanter Punkte gelegt. Der Anteil der Netzpunkte, die auf Erzkörner fallen, ergibt den Erzgehalt (s. Tabelle 2).

Mikroskopische Ausmessung liefert die Korngröße für die Basalte zu ca. 50 µ im Mittel.

Das reflexionsoptische Verhalten zeigt in den Erzkörnern bei allen Basalten lediglich Titanomagnetit an. Dabei können allerdings Einschlüsse anderer Kristalle $\lesssim$ 1 µ nicht ausgeschlossen werden.

4.12 Zusammenstellung magnetischer Meßergebnisse im Hinblick auf chemische Untersuchungen.

Da die Unterschiede der magnetischen Eigenschaften einen Zusammenhang mit der Entfernung der Meßprobe vom Säulenrande zeigen, können sie frühestens bei der Säulenbildung entstanden sein. In vielen Fällen zeigt lediglich der Säuelnrand Veränderungen (s. Abb. 14, 17 und 29). In einigen Fällen unterscheidet sich lediglich ein Stück des Säulenrandes vom übrigen Säulenquerschnitt in seinen magnetischen Eigenschaften (s. Abb. 22, 24, 36, 37 und 38). Auch wenn die Änderungen auf alle Teile des Randes verteilt sind, ergeben sich doch größere Schwankungen bei den Proben vom Rande als bei denen aus der Mitte (s. Tabelle 1). Säulenquerschnitte, in denen Risse enthalten sind, die in situ mit dem Außenraum verbunden waren, zeigen an diesen Stellen ein ähnliches Verhalten wie am Rande (s. Abb. 13, 20, 42 und 43). Solche R i s s e bedeuten eine Vergrößerung der äußeren Oberfläche.

Die hier zusammengestellten Beobachtungen zeigen, daß die Veränderungen der magnetischen Eigenschaften von der Säulenoberfläche ausgehen. Als Ursache käme also ein vom Säulenrand nach innen fortschreitender c h e m i s c h e r P r o z e s s in Frage; die Messungen von Sättigungsmagnetisierung und Curietemperatur zeigen (deutlich bei den tertiären Basalten) chemische Unterschiede zwischen den Titanomagnetiten vom Rande und von der Mitte der Basaltsäulen an.

4.13 Chemische Analysen und Debye-Scherrer-Aufnahmen

1. Für Debye-Scherrer-Aufnahmen[1] und chemische Analysen wurden Proben der Basaltsäule vom Steinberg/Meensen verwendet (insgesamt ca. 2000 g Gestein). Jeweils Proben aus der Säulenmitte und schmale Stücke, die beim Zersägen in würfelförmige Proben am Säulenrande übrig geblieben waren, wurden zu Pulver (Korngröße ca. 50 µ)[2] zermahlen. Aus einer Aufschlemmung in Wasser wurden die Titanomagnetite mit Hilfe eines Elektromagneten abgetrennt. Die so gewonnene Substanz wurde für Debye-Scherrer-Aufnahmen (mit einem Goniometer) benutzt. Dänach wurde das T r e n n v e r f a h r e n wiederholt; eine anschließende Goniometer-Registrierung ergab keine Veränderung der Reflexionswinkel. Nach dieser zweiten Anwendung des Trennverfahrens zeigte der abgesonderte Rest auch unter dem Mikroskop bereits eine große Ähnlichkeit mit der gereinigten Substanz; deshalb wurde diese dann ohne weitere Vorbehandlung zur chemischen Analyse benutzt[3].

---

1) Herrn Gramse vom Geochemischen Institut möchte ich für die Durchführung des magnetischen Trennverfahrens und die Anfertigung der Goniometer-Aufnahmen danken.

2) Eine noch feinere Ausmahlung wurde nicht vorgenommen, um etwaige Oxydation beim Mahlvorgang möglichst zu vermeiden,

3) Für die Ermöglichung der chemischen Analyse danke ich Herrn Prof. Dr. Glemser, für die Durchführung Fräulein Schmelz.

2. Für den Vergleich von Säulenrand und Säulenmitte war es wichtig, das Zermahlen und das Trennverfahren für den Basalt jeweils in möglichst gleicher Weise durchzuführen. Damit wurde zum Beispiel erreicht, daß die unvermeidbare V e r u n r e i n i g u n g durch Silikate in beiden Fällen gleich hoch war, wie sich daran zeigt, daß bei der chemischen Analyse die in Salzsäure aufgelösten Fe-Ionen jeweils einen Gewichtsanteil von 46,3 beziehungsweise 45,5 % der Analysensubstanz darstellten (s. Tabelle 4). Aufgrund der Färbung der Restsubstanz konnte der Anteil des nicht aufgelösten Eisens (an der Gesamtsubstanz) auf maximal 1 bis 2 % geschätzt werden; dieser Anteil war in der Mitte größer als am Rande.

3. Mit den Werten für Curietemperatur (s.Abb. 15 auf S.31), Sättigungsmagnetisierung (s. Tabelle 2 auf S. 23) und Gitterabstand (s. weiter unten) kann aus AKIMOTOS Diagrammen (s. Abb. 2 - 4 auf S. 11) das Gewichtsverhältnis Eisen/Titan auf 74/26 geschätzt werden. Damit läßt sich das Ergebnis der c h e m i s c h e n A n a l y s e vervollständigen (s. Tabelle 4).

4. E l e k t r o n e n m i k r o s k o p i s c h e Untersuchungen nach verschieden starker Ätzung von Anschliffen zeigten keine Titanohämatite für die verwendeten tertiären Basalte an (Experimente von Herrn Dr. Meitzner, Verfahren s. seine Arbeit von 1963). Hiermit kann allerdings nur eine geometrisch klar abgegrenzte Phase (Lamellen) einwandfrei nachgewiesen werden.

5. Die D e b y e - S c h e r r e r - Aufnahmen[+)] liefern für die Titanomagnetite vom Säulenrande einen geringeren Gitterabstand (8,444 AE) als für diejenigen von

[+)] Die Daten der Goniometer-Aufnahme:
Röhre: Fe, 30 kV, 14 mA; Mn-Filter.

Tabelle 4

Chemische Zusammensetzung des Erzes
(in Gew. %)

		Säulenmitte	Säulenrand
a.	aus chemischer Analyse des salzsäurelöslichen Eisens:	28,7 % Fe^{2+}	23,8 % Fe^{2+}
		16,8 % Fe^{3+}	22,5 % Fe^{3+}
b.	Abschätzung des unlöslichen Eisens aus der Färbung des Restes	ca. 1 - 2 % Fe	
c.	Abschätzung des Titangehaltes aus Gitterabstand, Curiepunkt und Sättigung	16 % Ti	16 % Ti
d.	Sauerstoff zu a. - c.	26,2 % O	26,9 % O

Silikate als Verwachsungen bringen mit ca. 10 % die Ergänzung auf 100 %.

der Säulenmitte (8,487 AE). Alle Goniometer-Registrierungen, sowie eine zur Kontrolle angefertigte photographische Aufnahme (Cr/V, 30 kV/12 mA)[+] weisen nur Titanomagnetit-Reflexe auf. Für die Titanomagnetite vom Säulenrande ergibt sich eine stärkere Linienbreite. Daraus ist auf eine größere Inhomogenität der kristallographischen Zusammensetzung zu schließen; dabei stellen auch mechanische Verspannungen eine Inhomogenität dar.

4.2 Vergleich der chemischen Analyse mit den magnetischen und kristallographischen Ergebnissen

4.21 Inhomogenität der Titanomagnetite am Säulenrande

Die Uneinheitlichkeit der Zusammensetzung zeigte sich ebenfalls bei der chemischen Analyse geringer Mengen. Daß auch die einzelnen Erzkörner am Säulenrande inhomogener zusammengesetz sind, folgt aus den höheren Beträgen für die K o e r z i t v k r a f t (s. Tabelle 3 auf S. 24).

4.22 Vergleich mit AKIMOTOS Diagrammen

Wie es sich nach AKIMOTOS Diagrammen (Abb. 2 - 4) ergeben muß, ist für die stärker oxydierten Proben am Säulenrande die Curietemperatur höher und der Gitterabstand geringer als in der Säulenmitte. Nach AKIMOTO sollte am stärker oxydierten Säulenrand die Sättigungsmagnetisierung erhöht sein. Das trifft jedoch nur für die rezenten Säulen zu, nicht aber für die tertiären. Den eigenen Ergebnissen entsprechen SCHULTS (1964) Untersuchungen über die $I_s(T)$-Kurven von Basaltproben aus der Göttinger Umgebung. Dabei

---

[+] Herrn Dr. Hanke möchte ich für die Herstellung der Aufnahme danken.

ergibt sich in einem Basaltvorkommen jeweils mit steigender Koerzitivkraft H_c (als Maß für die Veränderung) im allgemeinen eine Verringerung der Sättigungsmagnetisierung I_s und eine Erhöhung der Curietemperatur (s. Abb. 45).

Zur Begründung, weshalb hier bei allen Basalten von Oxydation gesprochen wird, obwohl chemische Analysen lediglich für den Basalt des Steinbergs/Meensen vorliegen:

Sogar bei der hohen Temperatur von 1200 bis 1300°C genügt nach WEBSTER/BRIGHT und TAYLOR ein Sauerstoff-Partialdruck von 10^{-4} at zur Oxydation aller Titanomagnetite. Es ist also von vornherein zu erwarten, daß bei chemischen Prozessen in der Natur der pauschale Sauerstoffgehalt zunimmt, so daß also bei tertiären (und rezenten) Basalten die Erhöung der Curietemperatur am Säulenrande plausibel als Oxydation zu deuten ist, zumal von einer Erhöhung der Curietemperatur zuverlässig auf eine Verringerung des Gitterabstandes zu schließen ist.

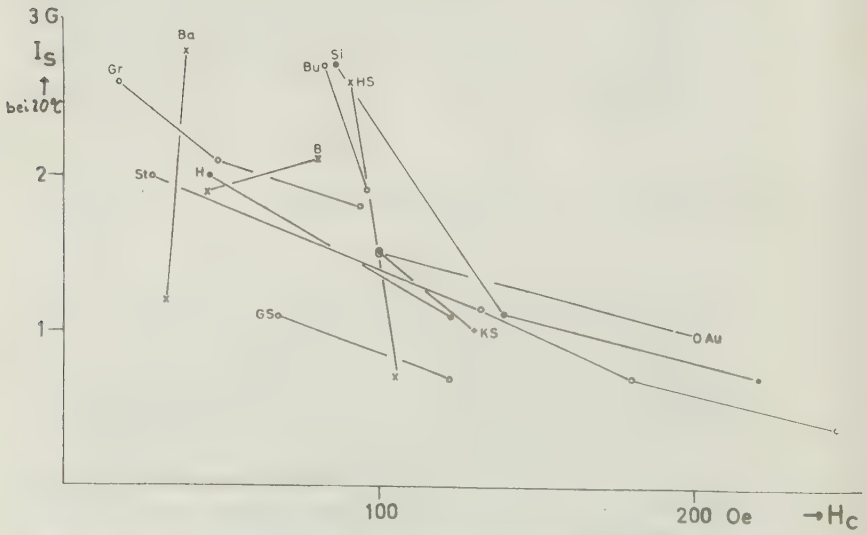


Abb. 45: Au = Auschnippe, B = Brackenberg, Ba = Bramburg, Bu = Brunsberg, GS = Großer Steinberg, Gr = Grefenburg, H = Hoher Hagen, HS = Hohe Schleife, KS = Kleiner Steinberg, Si = Silbersee, St = Steinberg/Meensen (umgezeichnet nach SCHULT, 1964)

4.23 Temperatureinfluß auf die Art des Oxydationsprozesses

1. E r h i t z u n g von Titanomagnetiten in Luft bei Temperaturen zwischen 200 und 700°C führt in relativ kurzer Zeit (Stunden oder Minuten) zu einer (durch chemische Analyse) nachweisbaren Oxydation (AKIMOTO/KATSURA, 1959). BEWERSDORFF (1961) und MEITZNER (1963) haben ausführliche Untersuchungen mit Erhitzung in Luft an Basalten aus der Göttinger Umgebung (einschließlich Steinberg/Meensen und Grefenburg) durchgeführt (s. Abb. 46). Dabei wurden Curietemperatur und Sättigungsmagnetisierung stark erhöht. Eigene Versuche zeigten bei Erhitzung von Proben des Steinbergs/Meensen in Wasserdampf von 250°C (und 40 at) ebenfalls dieses Ergebnis (s. Abb. 47).

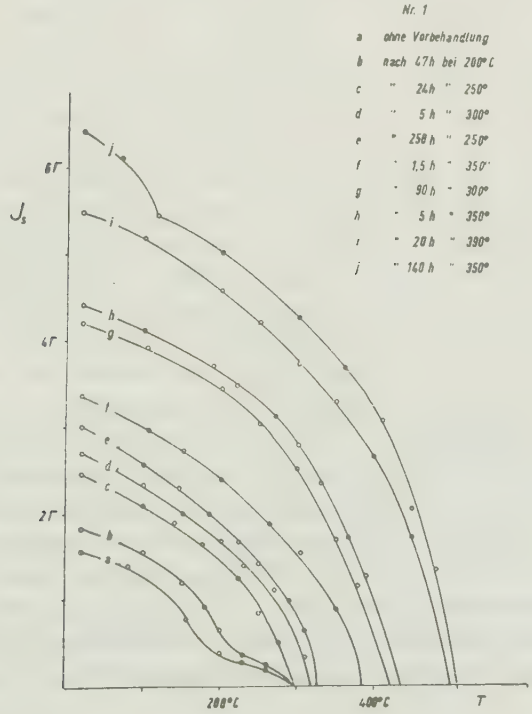


Abb. 46: Anstieg der Sättigungsmagnetisierung durch Erhitzung in Luft (nach BEWERSDORFF).

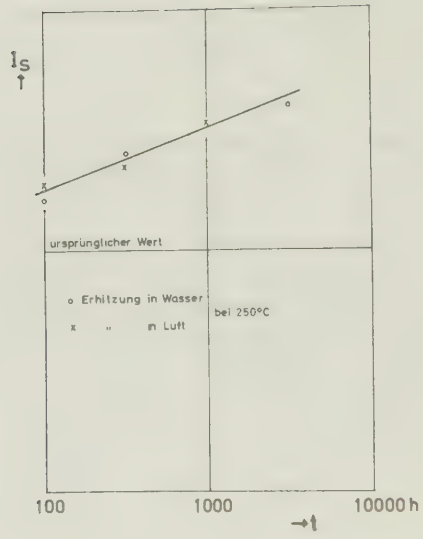


Abb. 47

2. Aus den Versuchsergebnissen ist zu schließen, daß der O x y d a t i o n s p r o z e s s bei den tertiären Basalten in der Natur a n d e r s als im Labor und bei den rezenten Basalten abläuft. Der Oxydationsprozeß hängt von der Temperatur, dem Sauerstoffpartialdruck, von Fehlstellen im Kristall-Aufbau als Keimen und eventuell von der Anwesenheit von Wasser ab. Der Sauerstoff-Partialdruck ist beim Abkühlungsvorgang gering, sonst würden die Titanomagnetite bereits dabei vollständig oxydiert. Später kann dann der atmosphärische Sauerstoff-Partialdruck erreicht werden, der auch bei den Laborversuchen herrschte. Die übereinstimmende Erhöhung der Sättigungsmagnetisierung bei den rezenten Basalten und bei Laborversuchen mit tertiären Basalten läßt darauf schließen, daß ein

Einfluß des Sauerstoff-Partialdruckes hier nicht vorliegt. Der unterschiedliche Ablauf des Oxydationsprozesses bei tertiären Basalten in der Natur und im Laborversuch schließt eine entscheidende Abhängigkeit von Fehlstellen im Kristall-Aufbau für die Art des Oxydationsprozesses aus.

3. Der Unterschied im Ablauf des Oxydationsprozesses ist also auf einen T e m p e r a t u r - Unterschied und eventuell auf verschiedenartige Wassereinwirkung, die ebenfalls temperaturabhängig wäre, zurückzuführen; denn Anwesenheit von Wasser bei 250°C übt keinen an der Sättigungsmagnetisierung erkennbaren Einfluß aus (s.o.).

4. Z u s a m m e n f a s s e n d kann für titanreiche Titanomagnetite mit niedriger Curietemperatur gesagt werden:
Die Oxydation der rezenten Basalte fand bei einer Temperatur von über 200°C statt. Die Verringerung der Sättigungsmagnetisierung am Rande von tertiären Säulen hingegen ist auf Oxydation nach der Abkühlung unter atmosphärischen Bedingungen zurückzuführen. Dabei soll eine vorherige Oxydation während der Abkühlung nicht ausgeschlossen werden; sie ist jedoch nicht mehr aus magnetischen Messungen zu erschließen.

4.24 Mögliche Ursachen für den Temperatur-Einfluß

1. Bei dem Oxydationsprozeß lagert sich am Rande und in den Rissen des Erzkornes Sauerstoff an; für eine Diffusion durch das Kristallgitter ist sein Ionenradius zu groß (HAUFEE, S. 582). K a t i o n e n d i f f u n d i e r e n dann durch das Kristallgitter zum Sauerstoff. Durch die Diffusion von Elektronen bleibt die elektrische Neutralität erhalten.

2. Das S a u e r s t o f f g i t t e r ist, verglichen mit dem Kationengitter, s e h r s t a b i l HAUFFE, S. 582). Eine Verschiebung einzelner Sauerstoffionen ist sehr erschwert, da diese in dichtester Kugelpackung gelagert sind. Wenn die Spinellphase in das rhomboedrische Gitter umgewandelt wird, müssen jeweils wenigstens ca. 100 Sauerstoffionen durch dieselbe Gitterschwingung in eine andere Ruhelage verschoben werden. Besonders bei der Tieftemperatur-Oxydation nach der Abkühlung kann kaum die dazu notwendige Energie aufgebracht werden. Dem entspricht es, daß trotz Anwendung von drei Methoden (Erzmikroskopie, Elektronenmikroskopie und Röntgenstreuung) keine rhomboedrische Phase gefunden werden konnte. Sogar bei einer Oxydationstemperatur von 500°C, die AKIMOTO zur Herstellung von künstlichen Proben benutzte, blieb das Spinellgitter auch bei stark oxydierten Proben erhalten (AKIMOTO et al., 1957, S. 169). Bei der Aufnahme einer $I_s(T)$-Kurve von Titanomaghemit (= oxydierter Titanomagnetit auf der Linie $FeTiO_3$-Fe_2O_3) trat trotz der Erhitzung (im Vakuum) auf 600°C allenfalls eine geringfügige Phasenumwandlung ein (AKIMOTO/KUSHIRO, 1960). Unterschiede im Ablauf des Oxydationsprozesses betreffen also wahrscheinlich nicht das Sauerstoffionen-Gitter, sondern nur die Kationenverteilung und die Elektronenspin-Konfiguration+).

3. Zur Erklärung der verschiedenen Auswirkung der Oxydation auf die magnetischen Eigenschaften gibt es dann insbesondere folgende zwei Möglichkeiten:

   a. Eine etwas verschiedene K a t i o n e n v e r t e i l u n g auf A- und B-Plätze im Kristallgitter kann sich je nach Entstehungsweise der Substanz ergeben (z.B. Abschreckung aus der Schmelze oder Oxydation sauerstoffärmerer Titanomagnetite

+) Die Elektronenspin-Konfiguration müßte mit Hilfe von Neutronenstreuung untersucht werden.

beziehungsweise Anlagerung im Kristallgitter bei hoher oder niedriger Temperatur). Die Sättigungsmagnetisierung ergibt sich nämlich als Differenz ungefähr gleich großer Summen der Elektronenspins aus beiden Untergittern; die Sättigungsmagnetisierung beträgt nur ca. 50 G bei den Titanomagnetiten der untersuchten Basalte (s. auch S. 10). Für andere Ferrite ist bekannt, daß durch Abschreckung die Sättigungsmagnetisierung erhöht wird (KNELLER, S. 72 ff.).

Nach GORTER (S. 343) ist Röntgenstreuung bei Spinellen wenig geeignet zur Untersuchung der Kationenverteilung. Gut geeignet bei Titanomagnetiten ist Neutronenstreuung, da besonders der Titan-Streuquerschnitt sich durch seine geringere Größe von den Streuquerschnitten der anderen Kationen unterscheidet.

b. Der Oxydationsprozeß könnte je nach seiner Temperatur verschieden starke Veränderungen des F e / T i - V e r h ä l t n i s s e s innerhalb des Randes und anderer Gebiete des Erzkorns hervorrufen. Eine zeitliche Konstanz des Fe/Ti-Verhältnisses kann ja von vornherein nur für das Erzkorn als Ganzes erwartet werden, wenn man einmal davon absieht, daß Kationen in Lösung gehen könnten[+]. Aus AKIMOTOS Diagramm (Abb. 4) ergibt sich, daß (insbesondere) bei (nichtoxydierten) Titanomagnetiten durch eine Trennung von Eisen und Titan die Sättigungsmagnetisierung anwachsen kann. Eine Trennung von Eisen und Titan ist etwas anderes

---

[+] Da nach GORTER (1957) die Bindung der Ti^{4+}-Ionen an die Oktaederplätze wesentlich stärker ist als die Bindung von Fe^{2+}- oder Fe^{3+}-Ionen an ihre jeweiligen Gitterplätze, ist beim Oxydationsprozeß eine Veränderung des Fe/Ti-Verhältnisses an verschiedenen Stellen des Erzkorn zu erwarten. Mikrosonden-Aufnahmen von MEITZNER (1963) zeigen eine systematische Zunahme der Fe-Konzentration zum Rande des Erzkorns hin, die allerdings auch bei der Bildung des Erzkorns erfolgt sein könnte.

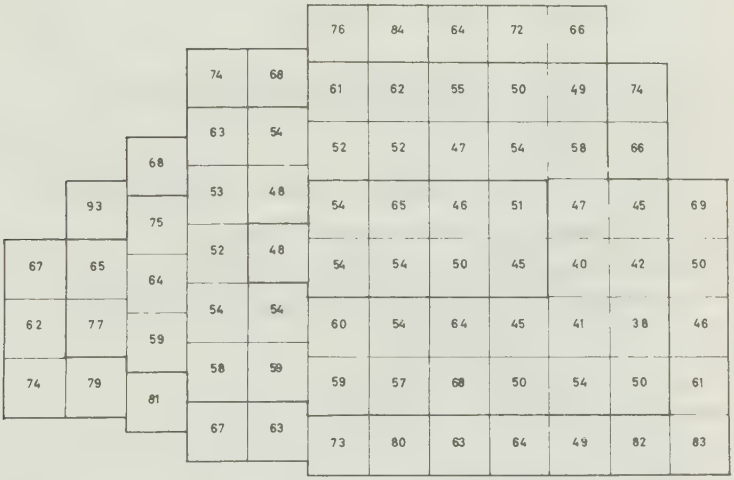
als Entmischung im herkömmlichen Sinne (PETERSEN, 1965, S. 69).

Das Fe/Ti-Verhältnis kann mit der Mikrosonde untersucht werden. Dabei wird mit Elektronenstrahlen charakteristische Röngenstrahlung erzeugt, mit deren Hilfe eine quantitative Messung der Konzentration jeweils eines Metalles erfolgen kann. Eine derartige Untersuchung hat zur K l ä r u n g d e s m a g n e t i s c h e n V e r h a l t e n s lediglich begrenzten Wert, da das Auflösungsvermögen nur ca. 1 µ beträgt. Zum Beispiel fand MEITZNER (1963) mit dem Elektronenmikroskop Titanohämatit-Lamellen mit der Breite von ca. 1/10 µ, deren chemische Zusammensetzung mit der Mikrosonde nicht geklärt werden konnte. Außerdem müßte zunächst die Abhängigkeit der Sättigungsmagnetisierung von der chemischen Zusammensetzung bei homogenen Titanomagnetiten genauer bekannt sein; erst dann kann eine Diskussionn über inhomogene Titanomagnetite ins einzelne gehen.

5. Zeitlicher Ablauf

5.1 Zeitliche Veränderungen der magnetischen Eigenschaften tertiärer Basaltsäulen.

Durch kurzzeitige Erhitzung über die Curietemperatur und anschließende Abkühlung im Erdfeld wurde eine künstliche Thermoremanenz [+)] in allen Proben eines Querschnittes einer tertiären Säule hergestellt (s. Abb. 48). Im Vergleich zur NRM zeigt die KTRM bei tertiären Basaltsäulen geringere Unterschiede innerhalb eines Säulenquerschnittes, bei der Grefenburg mit umgekehrtem Vorzeichen. Das Versuchsergebnis spricht dafür, daß die NRM nach ihrer Entstehung besonders am Säulenrande abnimmt.



Grefenburg II künstliche Thermoremanenz

Abb. 48: vgl. Abb. 10

[+)] kürzer: KTRM

Hinweise auf eine Veränderung der magnetischen Eigenschaften im Laufe geologischer Zeiten ergeben sich also aus:

a. der Verteilung von künstlicher Thermoremanenz in einem tertiären Basaltsäulenquerschnitt, die anders ist als von natürlicher Remanenz (s.o.),

b. der unterschiedlichen Veränderung der Sättigungsmagnetisierung durch Oxydation im Labor bei über 200°C und durch Oxydation in der Natur (s. S. 59) und

c. der verschiedenartigen Verteilung der magnetischen Eigenschaften (besonders der der NRM) in rezenten und tertiären Basaltsäulen; bei rezenten Säulen nahezu Konstanz, bei tertiären Säulen starke Unterschiede innerhalb eines Querschnittes (s. Tabelle 3 auf S. 24).

5.2 Mögliche Ursachen für die Abnahme der NRM

Vorgänge, die jeweils allein oder mit anderen zusammen die natürliche Remanenz verringern könnten, sind:

1. Einwirkungen des magnetischen Erdfeldes
2. Veränderungen der mechanischen Spannungen, die bei dem Abkühlungsprozeß entstanden waren
3. die Wärmebewegung
4. Oxydation

5.21 Einwirkungen des magnetischen Erdfeldes

Der TRM von Basalten ist oft eine viskose Magnetisierung anderer Richtung überlagert. Sie ist eine isothermale remanente Magnetisierung, die durch das Erdfeld im erkalteten Gestein hervorgerufen worden ist. Sie läßt sich leicht durch Abmagnetisierung in einem schwachen Wechselfeld entfernen. Bei weiterer Abmagnetisierung ändert sich die Richtung der verbleibenden NRM dann nicht mehr. Üblicherweise wird angenommen, daß die Restmagnetisierung ein Teil der ursprünglichen TRM ist, obwohl sicherlich andere Mechanismen denkbar wären, die ebenfalls dieses Ergebnis herbeiführen könnten. Für die Deutung, daß es sich um einen Teil der ursprünglichen Thermoremanenz handelt, spricht besonders folgendes:

a. NRM und KTRM zeigen ähnliche Härte gegenüber Abmagnetisierung.

b. Die guten Erfolge paläomagnetischer Untersuchungen lassen es unvernünftig erscheinen, anzunehmen, daß die gesamte NRM erst im Laufe geologischer Zeiten die jetzige Richtung angenommen hat[+)].

c. Wenn die gesamte NRM isothermalen Ursprung hätte, sollte man im Laufe der weiteren Abmagnetisierung eine weitere Richtungsänderung der Restremanenz erwarten.

Durch die Entfernung der viskosen Magnetisierung ändern sich die relativen Unterschiede der NRM innerhalb eines Querschnittes kaum (s. Abb. 16). Sie können also n i c h t mit einer Einwirkung des magnetischen Erdfeldes erklärt werden.

[+)] Dabei soll von Umkehr des Richtungssinns abgesehen werden.

5.22 Veränderungen der Abkühlungsspannungen

1. Da die Abkühlung der tertiären Basalte Jahrzehnte dauerte, sollte man annehmen, daß sich nach der Säulenbildung mechanische Spannungen weitgehend ausgeglichen haben. Dafür spricht auch, daß der Basalt über Jahrmillionen eine bemerkenswerte Stabilität zeigt, obwohl die Zerreißspannung nur ca. 200 at beträgt (LANDOLT-BÖRNSTEIN, IV.Bd., 1. Teil, S. 132, 1955). Nimmt man beim Entstehen der TRM, also bei 200°C, eine Zugspannung von ca. 20 % der Zerreißspannung, dazu eine fünfmal so große Druckspannung und noch 20 at Lagerdruck[1] an, so resultiert eine Gesamtspannung von ca. 260 at.

2. Nach verschiedenen Untersuchungen[2] ergibt sich lediglich bei metamorphen Gesteinen ein feststellbarer Einfluß von Spannungen mit der Größenordnung von wenigen 100 at auf die Veränderung einer Thermoremanenz; das ist auf die stark anisotrope Verteilung der Spannungen im Gestein und auf eine ausgeprägte Vorzugsrichtung für die Achsen der Erzkörner zurückzuführen. Der vergleichsweise isotrope Basalt zeigt einen geringeren Spannungseinfluß. Erst Druckspannungen ab ca. 1000 at können hier die Remanenz merklich verändern. Dabei ist eine Abnahme der Remanenz um ca. 10 % und eine Winkeländerung um höchstens 5° zu beobachten (HALL/NEALE, 1960, persönliche Mitteilung ADE-HALL, 1965). Nach STACEY (1963, S. 122) können irreversible Veränderungen der Remanenz erst bei Spannungen über 2500 at erwartet werden; Voraussetzung ist dabei eine ideale Struktur des Magnetits und isotropes Gestein.

---

1) Das entspricht einer Gesteinsschicht von 70 m.

2) GRAHAM/BUDDINGTON/BALSLEY (1957), DALY (1959), STOTT/STACEY (1959).

3. Die mechanischen Spannungen der verwendeten tertiären Basaltsäulen änderten sich aber lediglich um maximal 260 at. Eine derartige Änderung kann als unwesentlich für die NRM betrachtet werden. Dem entspricht es, daß keine systematischen Unterschiede der Magnetisierungs-Richtung in den Säulen festgestellt werden konnten.

4. In Verallgemeinerung dieses Ergebnisses kann auch der Einfluß der Abkühlungsspannungen auf die übrigen magnetischen Eigenschaften vernachlässigt werden. Dem entspricht auch, daß die Anisotropie der magnetischen Suszeptibilität keinen Zusammenhang mit der Säulenstruktur zeigt.

5.23 Wärmebewegung

Hat bei den tertiären Basalten die Wärmebewegung im Verlaufe geologischer Zeiten eine Abnahme der NRM hervorgerufen und zu deren jetziger Verteilung in der Basaltsäule geführt? Als mögliche Ursachen sind zu untersuchen:

a. Am Rande der Basaltsäule haben größere Temperaturschwankungen als in der Mitte stattgefunden.

b. Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung und im Kristallaufbau führen zu verschiedenen Zeiten für die Verringerung der NRM.

zu a. Die Temperaturschwankungen im Innern der Säule sind geringer oder höchstens ebenso groß wie am Rande. Die tertiären Basaltsäulen sind aus Steinbrüchen entnommen worden. Sie lagerten also praktisch immer so tief unter der Erdoberfläche, daß sich wahrscheinlich nicht einmal jahreszeitliche Temperaturschwankungen bei ihnen ausgewirkt haben.

zu b.

1. Die Formel für die Relaxationszeit der Ummagnetisierung von Eindomänenkörnern (s.S. 13) liefert für die Erzkörner Zeiten, die groß gegen die bisherige Lebensdauer des Gesteins sind. Für Bezirksdrehungen in Körnern mit mehreren Domänen dürften ähnliche Relaxationszeiten gelten. Von B e z i r k s d r e h u n g e n kann also überhaupt abgesehen werden.

2. Die Wärmebewegung kann aber leichter B l o c h - w a n d - V e r s c h i e b u n g e n hervorrufen (s. auch S.15). Für die Zeit t_o, bis zu der im Mittel eine Wandverschiebung stattfindet, soll folgende Abschätzung dienen (vgl. STACEY, 1963, S. 78):

$$t_o = C \exp (H_c I_s F d / k T)$$

Dabei ist C eine Konstante, H_c die Koerzitivkraft, I_s die Sättigungsmagnetisierung, F die Fläche einer Blochwand, d die Verschiebung der Blochwand, k die Boltzmannkonstante und T die absolute Temperatur.

3. Sicher hängt die Korngrößenverteilung des Titanomagnetits nicht vom Ort in der Säule ab (s.auch S4); für den Vergleich von Wandverschiebungszeiten kann angenommen werden, daß die Verteilung der Flächengröße von Blochwänden nur wenig vom Ort in der Säule abhängt. Die Zeit bis zu einer bestimmten Blochwandverschiebung d_o bei konstanter Temperatur T_o ist lediglich eine Funktion des Produkts $H_c I_s F$; dabei weist H_c die stärkste Abhängigkeit von Abstand zum Säulenrand auf. Zur Erklärung der Verteilung der NRM müßte das Produkt

H_c I_s F am Rande der Säule kleiner sein als in der Mitte; tatsächlich ist es aber umgekehrt am Rande größer. Die Wärmebewegung kann zwar Ursache einer Verringerung der NRM sein, die Verteilung der NRM in tertiären Basaltsäulen kann sie aber nicht erklären.

4. Eine andere Überlegung kann mit Hilfe von A b - m a g n e t i s i e r u n g d u r c h W e c h s e l f e l d durchgeführt werden. Eine je größere Energie für die Verschiebung einer Blochwand erforderlich ist, eine desto höhere Feldstärke ist zur Abmagnetisierung im Wechselfeld oder eine desto längere Zeit zur Abmagnetisierung durch thermische Schwankungen notwendig. Abmagnetisierung durch ein Wechselfeld liefert für die NRM am Rande und in der Mitte einer tertiären Basaltsäule gleiche relative Abnahme (s. Abb. 49 und 50). Die KTRM zeigt bei Proben vom Rande und der Mitte der Basaltsäule geringere Unterschiede als die NRM (z.T. mit umgekehrtem Vorzeichen); die KTRM ist bei Randproben härter gegen Abmagnetisierung durch Wechselfeld (s. Abb. 51 und 52). Auch hier ergibt sich, daß mit der Wärmebewegung nicht die Verteilung der NRM in tertiären Säulen erklärt werden kann.

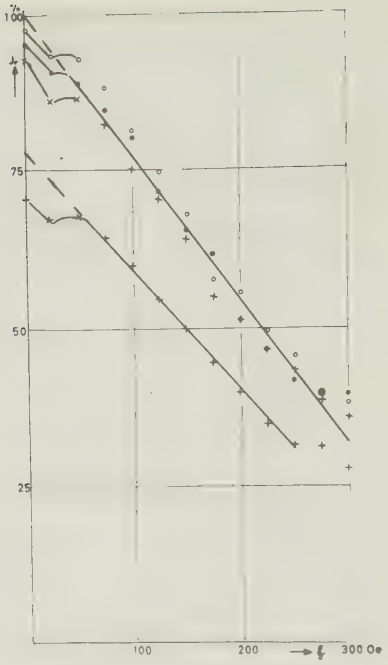


Abb. 49:
Abmagnetisierung im Wechselfeld von natürlicher Remanenz, Hauptkomponente (Steinberg II)

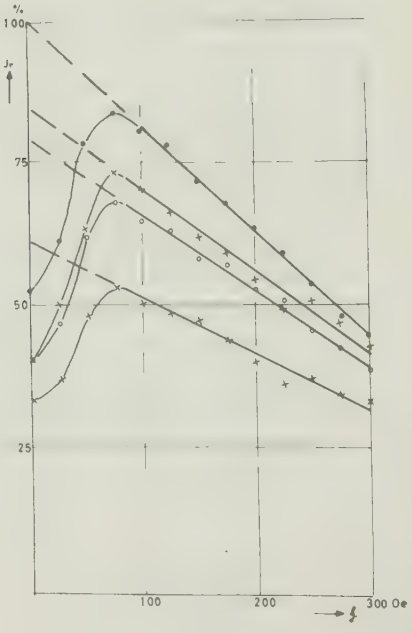


Abb. 50:
entsprechend Abb. 49 hier zweitstärkste Komponente (in dem durch die Proben-Würfelkanten vorgegebenen Koordinatensystem)

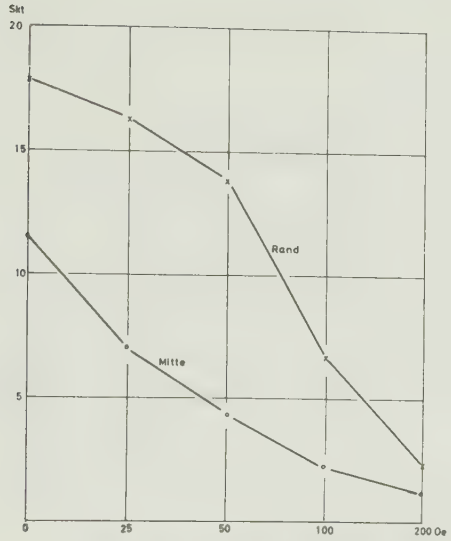


Abb. 51 Wechselfeld-Abmagnetisierung von künstlicher Thermoremanenz Grefenburg II (1 Skt = 50 · 10^{-5} G)

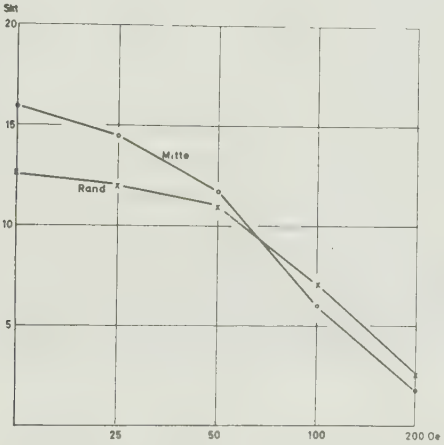


Abb. 52 Wechselfeld-Abmagnetisierung von künstlicher Thermoremanenz Steinberg V (1 Skt = 40 · 10^{-5} G)

5.24 Oxydation

Nach S. 59 findet die Oxydation im wesentlichen nach der Abkühlung statt.

a. Die Sauerstoff-Aufnahme bei der Oxydation führt normalerweise zu einer V o l u m e n z u n a h m e (ca. 4 % in der Mitte und maximal ca. 8 % am Rande der tertiären Basaltsäulen). Falls überhaupt keine Ausdehnung des Erzkornes möglich wäre, würde anstelle der Volumenzunahme, wie sie aus der chemischen Analyse auf S.54 folgt, ein Druck von etlichen 1000 at auftreten. Die zur Wahrung des Kräftegleichgewichts auftretenden Zugspannungen können sich auf eine größere Umgebung verteilen, so daß sie dem Betrage nach kleiner sind als die Druckspannungen; sie brauchen die Zerreißspannung, die für Basalt im großen gilt, nicht zu überschreiten. Bei dem Oxydationsprozeß können also starke Spannungen auftreten, die dann eine Veränderung der Bezirkseinteilung und der Magnetisierungsrichtung des einzelnen Bezirks bewirken; nach dem Ausgleich derartiger Spannungen können bei weiterer Oxydation erneut Kräfte entstehen.

b. Bei Oxydation, die nicht gleichmäßig im ganzen Korn verläuft, können stärkere Ä n d e r u n g e n d e s ä u ß e r e n m a g n e t i s c h e n M o m e n t e s e i n e s K o r n s auftreten, da sich die spontane Magnetisierung der Weiss'schen Bezirke verschieden stark ändert. Wenn auf diese Weise ein Moment beliebiger Richtung entsteht, kann das zugehörige entmagnetisierende Feld eine Wandverschiebung verursachen, die auch die ursprüngliche thermoremanente Ausrichtung verringert.

Durch beide Mechanismen würde bewirkt, daß in einem gewissen Anteil der Erzkörner die frühere Thermoremanenz verringert wird. Besonders dort, wo nur eine schwache Oxydation vorliegt, bleibt jedoch die Magnetisierung gut erhalten. Anders ausgedrückt: Die verbleibende TRM ist in wenig oxydierten Erzkörnern lokalisiert. Dem entspricht es, daß Wechselfeldabmagnetisierung der NRM für Proben aus der Säulenmitte und vom Rande zu der gleichen relativen Abnahme führt (s. Abb. 49 und 50). Dagegen zeigt die KTRM entsprechend der höheren Koerzitivkraft am Säulenrande dort auch eine größere Härte gegen Abmagnetisierung durch Wechselfeld (s. Abb. 51 und 52); die stärker oxydierten Körner tragen zur KTRM in höherem Maße bei als zur NRM.

5.3 Ausblick

1. Der letzte Abschnitt hat ergeben, daß die Veränderungen der magnetischen Eigenschaften hauptsächlich auf einen Oxydationsprozeß im Verlaufe geologischer Zeiten zurückzuführen sind. Das Ergebnis beruht auf der Untersuchung von 9 rezenten Basaltsäulen und 2 tertiären Basaltsäulen, wobei SCHULTS (1964) Untersuchungen an 11 verschiedenen tertiären Basalten (s.S. 56) die eigenen Ergebnisse ergänzen. Es stellt sich die Frage, wieweit die gefundene Deutung auf andere Basalt-Vorkommen übertragbar ist.
2. Nach VERHOOGEN (1962) sind unter atmospärischen Bedingungen lediglich Fe_2O_3 und TiO_2 stabil. Zu diesen Mineralien muß letztlich der Oxydationsprozeß führen.

3. Die Oxydationsgeschwindigkeit hängt von vielen Einzelbedingungen ab, wie von der Temperatur, der Zufuhr von Luft und Wasser, der chemischen Zusammensetzung des Erzes, den Fehlstellen im Kristallgitter und der Korngröße des Erzes; die Zufuhr von Luft und Wasser hängt im einzelnen von der Größe der Basaltsäule, von gröberen und feineren Rissen, Poren und Kapillaren im Basalt ab. welche Unterschiede bei der Oxydations-Geschwindigkeit auftreten, muß durch die Untersuchung möglichst vieler Säulen verschiedenen Alters ermittelt werden.

4. Auch die Art des Oxydationsprozesses hängt von verschiedenen Bedingungen ab; auf S. 59 wurde ein Einfluß der Temperatur auf die Auswirkung des Oxydationsprozesses gefunden: Die andersartigen Ergebnisse für die Säule von Godafoss scheinen damit zusammenzuhängen, daß sich die chemische Zusammensetzung ihres Erzes deutlich von den übrigen Säulen unterscheidet. Eine titanreiche Zusammensetzung des Erzes, wie sie nach ihren magnetischen Eigenschaften fast alle verwendeten Basaltsäulen aufweisen, ist auch sonst häufig anzutreffen. Ein Ablauf des Oxydationsprozesses mit ähnlichen Auswirkungen auf die magnetischen Eigenschaften sollte demnach für viele Basalte erwartet werden, zumal nach der Abkühlung des Basaltes nur verhältnismäßig geringe Temperatur-Unterschiede auftreten, besonders wenn der Basalt an jahreszeitlichen Temperaturschwankungen nicht teilnimmt. Größere Klima-Unterschiede allerdings könnten sich doch auf die Art des Oxydationsprozesses auswirken. Dabei soll von Wiedererhitzung durch spätere Lavaeinflüsse abgesehen werden.

5. Eine s t a t i s t i s c h e A b s i c h e r u n g der hier gefundenen Ergebnisse ist aber in jedem Fall wünschenswert. Vielleicht kann bei paläomagnetischen Arbeiten die Frage mitbehandelt werden, am besten so, daß für ein Basalt-Vorkommen jeweils ein Säulenquerschnitt untersucht wird, oder - ähnlich dem Vorgehen SCHULTS - indem die Sättigungsmagnetisierung in Abhängigkeit verschiedener Werte für die NRM und die Koerzitivkraft untersucht wird.

Literaturverzeichnis

(1) S. Akimoto, T. Katsura, M. Yoshida:
Magnetic Properties of $TiFe_2O_4$ - Fe_3O_4 System and Their Change with Oxidation.
J.Geom. and Geoel. v. 9, no 4, S. 165 - 178, 1957.

(2) S. Akimoto and T. Katsura:
Magnetic-Chemical Study of the Generalized Titanomagnetite in Volcanic Rocks.
J.Geom. and Geoel. v. 10, no 3, S. 69 - 90, 1959.

(3) S. Akimoto and J. Kushiro:
Natural Occurrence of Titanomaghemit and its Relevance to the Unstable Magnetization of Rocks.
J.Geom. Geoel., v.11, S. 106, 1960.

(4) S. Akimoto:
Magnetic Properties of FeO-Fe_2O_3-TiO_2-System as a Basis of Rock Magnetism.
J.Phys.Soc.Jap., v. 17, S. 706, 1962.

(5) A. Bewersdorff:
Der Einfluß der Entmischung auf die remanente Magnetisierung von Titanomagnetiten.
Z. Geophys. 27, S. 215 - 256, 1961.

(6) R. Brinkmann:
Bildung von Basaltsäulen
Geol. Rundschau, 46, 1957.

(7) H.C. Brown, M.A. Khan, F.D. Stacey:
A Search for Flow Structure in Columnar Basalt using Magnetic Anisotropy Measurements.
Pure and appl. Geophys. v. 57, S. 61 - 65, 1964.

(8) L. Daly:
Sur l'anisotropie magnétique dans les roches deformees et la nature de leur aimantation remanente naturelle.
Acad.Sci.(Paris) C.R. hebdomaires, v. 248, no 18, S. 2614, 1959.

(9) K. Fromm:
Untersuchung der Magnetisierung des Basaltvorkommens am Hohen Hagen.
Diplomarbeit, Math.-Nat., Göttingen, 1958 (unveröffentl.)

(10) E.W. Gorter:
Chemistry and magnetic properties of some ferrimagnetic oxides like those occuring in nature.
Adv. in Phys., v. 6, S. 336, 1957.

(11) J.W. Graham, A.F. Buddington, J.R. Balsley:
Journ. Geophys. Res. 62, S. 465, 1957.

(12) J.M. Hall, R.N. Neale:
Stress Effects on Thermoremanent Magnetization.
Nature, v. 188, no 4753, 1960.

(13) K. Hauffe:
Reaktionen in und an festen Stoffen.
Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1955.

(14) E. Kneller:
Ferromagnetismus.
Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1962.

(15) G. Kjartansson:
Geological Map of Iceland, 1 : 250 000.
Published by the Cultural Fund, Reykjavik; sheet 3, 1960; sheet 6, 1962; sheet 5, 1965.

(16) S. Koritnig:
Die Blaue Kuppe bei Eschwege mit ihren Kontakterscheinungen.
Heidelberg Beitr.z.Min.u.Petr, 4 (1955), S. 504.

(17) Landolt-Börnstein, IV. Bd., 1. Teil, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1955; I. Bd., 4. Teil, Berlin, Göttingen, Heidelberg, .

(18) W. Langhoff:
Über die Reproduzierbarkeit thermoremanenter Messungen am Basalt des Steinberges bei Barlissen.
Diss., Math.-Nat., Göttingen, 1958.

(19) W. Meitzner:
Untersuchungen der magnetischen Eigenschaften des Backenberges bei Güntersen.
Diplomarbeit, Math.-Nat., Göttingen, 1961. Auszug veröffentlicht in Z. Geophys. 28, 1, 1962.

(20) W. Meitzner:
Der Einfluß von Entmischung und Oxydation auf die magnetischen Eigenschaften der Titanomagnetite in Basalten bei 250°C und 350°C.
Beitr.Min.u.Petr., 9, S. 320, 1963,

(21) H. Murawski:
Die tertiären Basaltvorkommen der Umgebung von Göttingen.
Neues Jahrbuch Geol. und Paläontol. Mh. 8, 1956, 1, Stuttgart 1957.

(22) T. Nagata and S. Akimoto:
Fundamental Basis of Rock Magnetism.
(presented to the Committee on Secular Variation and Palaeomagnetism, International Association of Geomagnetism and Aeronomy held at Helsinki, Finland, in July/August 1960.)

(23) T. Nagata:
Magnetic Properties of Ferrimagnetic Minerals of Fe-Ti-O System.
Prc.Bened. Earth Magnetism Symposium, S. 69, 1962.

(24) L. Néel:
Proprietes magnetiques des ferrites: Ferrimagnetisme et antiferromagnetisme.
Ann. Phys. 3, S. 137, 1948.

(25) L. Néel:
Some theoretical Aspects of Rock magnetism Advances in Phys., 4, 14, 1955.

(26) Minoru Ozima and Mituko Ozima:
Origin of Thermoremanent Magnetization.
J. Geophys. Res., v. 70, S. 1363, 1965.

(27) L.G. Parry:
Magnetic Properties of dispersed magnetic powders.
Phil. Mag., v. 11, S. 303 - 312, 1965.

(28) N. Petersen:
Beobachtung einiger mineralogischer und magnetischer Eigenschaften dreier Basaltproben nach unterschiedlicher thermischer Behandlung.
Diss. Nat. Fak. Universität München, 1965.

(29) H. Schneiderhöhn:
Erzmikroskopisches Praktikum, Stuttgart, 1952.
Anhang: Erzmikroskopische Bestimmungstafeln.

(30) A. Schult:
Über die Umkehr der remanenten Magnetisierung von Titanomagnetiten in Basalten.
Beitr.Min.u.Petr. 11, S. 196 - 216, 1965.

(31) H. Soffel:
Untersuchung der magnetischen Elementarbereichsstrukturen von natürlichem Magnetit.
Diss. Nat. Fak., Universität München, 1964.

(32) F.D. Stacey:
The Physical Theory of Rock Magnetism.
Adv. Phys., v. 12, 1963.

(33) P.M. Stott; F.D. Stacey:
Magnetostriction and Paleomagnetism of Igneous Rocks.
Nature, v. 183, no 4658, 1959.

(34) R.W. Taylor:
Phase Equilibria in the system FeO - Fe_2O_3 - TiO_2 at 1300°C.
Thesis, Penn. State Univ., 1961.

(35) J. Treu:
Wechselfeldabmagnetisierung von Gesteinsproben: Bau und Anwendung einer Apparatur.
Staatsexamensarbeit, Göttingen 1964 (unveröffentlicht).

(36) J. Verhoogen:
Oxidation of Iron-Titanium Oxides in Igneous Rocks.
J. Geol. 70, S. 168 - 181, 1962.

(37) A.H. Webster and N.F.H. Bright:
The System Iron-Titanium-Oxygen at 1200°C and Oxygen Partial Pressures Between 1 Atm and $2 \cdot 10^{-14}$ Atm.
J. Am. Ceram. Soc., v. 44, S. 110 - 116, 1961.

(38) G. Zech:
Die Verteilung der magnetischen Eigenschaften in Basaltsäulen.
Diplomarbeit, Math.-Nat. Göttingen, 1962 (unveröffentl.).

Für die wohlwollende Förderung meiner Arbeit bin ich Herrn Prof. Dr. J. Bartels zu Dank verpflichtet. Für die Fortführung der Betreuung dieser Arbeit nach dem Tode von Herrn Prof. Dr. J. Bartels danke ich Herrn Dr. M. Siebert, für Rat und Hilfe Herrn Prof. Dr. K.H. Wedepohl, Herrn Prof. Dr. S. Koritnig, Herrn Dr. Freund und Herrn Dr. W. Meitzner.

Mein besonderer Dank für die praktische und wissenschaftliche Unterstützung bei meinem Island-Aufenthalt gilt Herrn Prof. Dr. Th. Sigurgeirsson, Herrn Dr. G. Sigvaldason, Herrn Dr. J. Jonsson und Herrn Dr. H. Thomasson.

Der Firma Dr.-Ing. F.X. Michels, Niedermendig/Eifel, danke ich für das verständnisvolle Entgegenkommen beim Zersägen der Basaltsäulen.

Lebenslauf.

Am 19.6. 1937 wurde ich als Sohn des Oberstudienrats Dr.-Ing. habil. Theodor Zech und seiner Ehefrau Adolfine geb. Baseler in Darmstadt geboren. Dort wurde ich im Herbst 1943 eingeschult. Nach kriegs- und nachkriegsbedingten Aufenthalten in Neuteich/Danzig und Rimbach/Odenwald kehrte unsere Familie Ostern 1952 nach Darmstadt zurück, wo ich am 29.2. 1956 die Reifeprüfung am Alten Realgymnasium bestand. An der dortigen Technischen Hochschule begann ich im Sommersemester 1956 das Studium der Physik. Nach der Diplom-Vorprüfung wechselte ich für das Wintersemester 1958/59 an die Universität München über. Im Sommersemester 1959 setzte ich mein Studium an der Universität Göttingen fort. Hier fertigte ich im Geophysikalischen Institut bei Herrn Prof. Dr. Bartels eine Diplomarbeit an. Am 8.11. 1962 betand ich die Diplom-Hauptprüfung mit "gut".